

„Theoretische Betrachtung der Komponenten- ermüdung eines solarthermischen Kraftwerkes mit Hilfe transienter Wärmetransportmodelle“

Master Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science (M.Sc.)

an der Universität Koblenz-Landau

Fachbereich 3: Mathematik / Naturwissenschaften

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Joscha Bongardt

aus Düsseldorf

Koblenz, 2014

„Theoretische Betrachtung der Komponenten- ermüdung eines solarthermischen Kraftwerkes mit Hilfe transienter Wärmetransportmodelle“

Master Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science (M.Sc.)

an der Universität Koblenz-Landau

Fachbereich 3: Mathematik / Naturwissenschaften

Vorgelegt

am 30. April 2014

von Dipl.-Ing. (FH) Joscha Bongardt
geb. am 27. März 1978

Referent: Dr.-Ing. Michael Wittmann, DLR Stuttgart

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Willi Nieratschker, Hochschule Koblenz

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	V
Bildverzeichnis.....	VI
Abkürzungen	XII
Symbole und Formelzeichen	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Solarthermische Anlagen zur Stromerzeugung	1
1.2 Schadenmechanismen und kritische Komponenten	3
1.3 Eingrenzung der Aufgabenstellung	8
2 Skalierung der Messwerte	9
2.1 Beschreibung der Referenzanlage und deren Messwerte	9
2.2 Festlegung des Zielprozesses.....	11
2.3 Skalierung der Prozessdrücke.....	13
2.3.1 Zusammenhang von Druck und Massenstrom	13
2.3.2 Skalierung des Frischdampfdruckes.....	15
2.3.3 Skalierung des Dampftrummeldruckes	16
2.3.4 Skalierung des Druckes am Austritt des Überhitzers.....	19
2.4 Skalierung der Prozesstemperaturen	20
2.4.1 Skalierung der Dampftemperatur in der Dampftrommel	20
2.4.2 Skalierung der Dampftemperatur am Ende des Überhitzers	20
2.4.3 Überlegungen zum transienten Verhalten der Temperatur	23
2.5 Skalierung des Massenstromes	26
2.6 Verwendete Datensätze in der Übersicht.....	27
3 Dimensionierung der Bauteile.....	30
3.1 Wandstärkenberechnung	30
3.1.1 Vergleichsspannung in zylindrischen Bauteilen	30
3.1.2 Wandstärkenberechnung bei Verschwächung durch Ausschnitte	32
3.2 Eingesetzte Materialien und ihre Eigenschaften	35
3.3 Spannungskonzentrationsfaktoren für die Ermüdungsberechnung	38

3.4	Die Wahl der kritischen Schnitte	44
3.4.1	Dampftrommel	44
3.4.2	Überhitzer	45
3.4.3	Überhitzersammler	45
3.4.4	Frischdampfleitung	46
3.4.5	Zusammenfassung	46
4	Modell zur Beschreibung der instationären Temperaturverteilung durch Wärmeleitung	48
4.1	Hintergrund	48
4.2	Diskretisierung der Fourier-Gleichung zur Wärmeleitung	52
4.2.1	Finite Differenzen Methode	52
4.2.2	Crank-Nicolson Verfahren	54
4.3	Ansetzen der Randbedingungen	56
4.3.1	Aufstellen des linearen Gleichungssystems	56
4.3.2	Konvektion an der Innenseite des Bauteils	57
4.3.3	Konvektion an der Außenseite des Bauteils	59
4.3.4	Strahlung an der Außenseite des Bauteils	60
4.4	Bestimmung der Randbedingungen	61
4.4.1	Wärmeübergangskoeffizienten für den Nassdampf	61
4.4.2	Wärmeübergangskoeffizient für den überhitzten Dampf	63
4.4.3	Bestrahlungsstärke auf dem Überhitzerrohr	64
4.5	Umsetzung der Wandtemperatursimulation in MATLAB	67
4.6	Programmverifizierung	68
5	Bestimmung der Niedriglastwechselermüdung	73
5.1	Berechnung der Betriebsspannungen	73
5.1.1	Hintergrund	73
5.1.2	Bestimmung der Temperaturspannung	74
5.1.3	Bestimmung der Spannung aus dem Betriebsinnendruck	75
5.1.4	Bestimmung der Vergleichsspannung	76
5.2	Lastwechselzählung	78

5.2.1	Identifizierung der Lastwechsel und deren maßgeblicher Größen.....	78
5.2.2	Bestimmung der Ermüdung	82
5.2.3	Bewertung der Restextremwertfolge.....	86
6	Ergebnisse der Ermüdungsberechnung	88
6.1	Die Ermüdung in den einzelnen Schnitten	88
6.2	Sensitivitätsbetrachtungen	94
6.2.1	Veränderung der Wandstärke	94
6.2.2	Veränderung des Innendurchmessers	97
6.2.3	Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten	101
6.2.4	Veränderung der Spannungskonzentrationsfaktoren	104
6.2.5	Phasenversatz zwischen der Druck- und Temperaturzeitreihe	107
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
	Literaturverzeichnis.....	113
	Anhang A Gemessene Prozessdaten.....	116
A.1	Gemessen am 01. Mai 2012	116
A.2	Gemessen am 11. Mai 2012	117
A.3	Gemessen am 21. Mai 2012	119
A.4	Gemessen am 01. Juni 2012	120
A.5	Gemessen am 04. Juni 2012	122
	Anhang B Wärmeschaltbild der Turbine mit Vorwärmung.....	124
	Anhang C Skalierte Prozessdaten	125
C.1	Skalierungsmatrix	125
C.2	Aus Messdaten vom 01. Mai 2012	126
C.3	Aus Messdaten vom 11. Mai 2012	129
C.4	Aus Messdaten vom 21. Mai 2012	132
C.5	Aus Messdaten vom 01. Juni 2012	135
C.6	Aus Messdaten vom 04. Juni 2012	138
	Anhang D Auslegungsdaten.....	141
	Anhang E Simulationsergebnisse.....	142
E.1	Testrechnungen.....	142
E.2	Dampftrommel.....	144

E.3	Überhitzersammler 1. Strang.....	149
E.4	Überhitzersammler letzter Strang.....	164
E.5	Überhitzer (Receiver)	174
E.6	Frischdampfleitung.....	189
E.7	Ausgesuchte Simulationsergebnisse der Variationsrechnungen	199
Anhang F Ausgesuchte Ergebnisse der Ermüdungsberechnung.....		202
F.1	Ohne Variation	202
F.2	Mit Variation der Wandstärke	204
F.3	Mit Variation des Innendurchmessers	205
F.4	Mit Variation des Wärmeübergangskoeffizienten.....	206
F.5	Mit Variation der Spannungskonzentrationsfaktoren.....	207
Anhang G MATLAB Skripte.....		208
G.1	Extrahierung und Skalierung der Messdaten.....	208
G.2	Erzeugung der Regressionspolynome für die Materialeigenschaften	217
G.3	Wandtemperatursimulation	222
G.4	Diagramme der Spannungskonzentrationsfaktoren.....	236
G.5	Schädigungsberechnungen	240
G.6	Zusammenfassende Diagramme.....	255
Erklärung.....		270

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der Eckdaten von Referenzanlage und Zielprozess.....	13
Tabelle 2-2: Übersicht über die verwendeten Skalierungsdatensätze und die dafür verwendeten Gleichungen	28
Tabelle 3-1: Übersicht über die Durchmesser und Wandstärken der einzelnen Schnitte und den daraus resultierenden Spannungskonzentrationsfaktoren	47
Tabelle 6-1: Übersicht über die in der Basisrechnung und der Variationen veränderten Parameter	93
Tabelle 7-1: Übersicht über die Sensitivität auf Vergrößerung des Variationsparameters (positive Zahle bedeuten eine geringere Schädigung).....	111
Tabelle C-1: Zusammenfassung der angewendeten Skalierungen und der dazu herangezogenen Messdaten.....	125
Tabelle D-1: Auslegungszahlenwerte in der Übersicht.....	141

Bildverzeichnis

Bild 1-1: Konzentration von Solarstrahlung mit Linienkonzentratoren (links: Parabolrinne, rechts: Fresnelkollektor), Quelle: Quaschnig (2013)	1
Bild 1-2: Prinzip eines Parabolrinnenkraftwerks mit Thermoöl als Wärmeträgermedium, Quelle: Quaschnig (2013)	2
Bild 2-1: Prinzipielles Verschaltungsschema von Verdampfer und Überhitzer im Referenzkraftwerk, Quelle: Hirsch, et al. (2013)	9
Bild 2-2: Foto eines Hochtemperaturabsorberrohres mit Glashüllrohr, Quelle: Quaschnig (2013) ...	10
Bild 2-3: Anlagenschema für den skalierten Prozess mit Verdeutlichung der Orte für die gesuchten Prozessparameterverläufe	12
Bild 2-4: Verlauf des Trommeldruckes im Festdruckbetrieb	16
Bild 2-5: Druckverlustverhältnis des Überhitzers bei dem skalierten Prozess in Abhängigkeit des Stranganzahlverhältnisses	18
Bild 2-6: Verlauf der gemessenen direkt-normalen Bestrahlungsstärke über einen kurzen Zeitraum ..	25
Bild 3-1: Wirksame Flächen bei der Spannungsberechnung in einem zylindrischen Bauteil	30
Bild 3-2: Wirksame Flächen bei der Spannungsberechnung in einem zylindrischen Bauteil mit Abzweig	33
Bild 3-3: Temperaturabhängige Materialeigenschaften und deren Regression durch Polynome	36
Bild 3-4: Festigkeitskennwerte der eingesetzten Werkstoffe	37
Bild 3-5: SKF für den Druck α_m in Abhängigkeit des Innendurchmesser- und Wandstärkenverhältnisses (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)	41
Bild 3-6: SKF für die Temperaturdifferenz α_t in Abhängigkeit des Innendurchmesser- und Wandstärkenverhältnisses (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)	42
Bild 3-7: Prinzipielle Darstellung der Temperaturspannungen im Verschneidungsbereich zweier Zylinder bei kleinen und großen Durchmesser-Verhältnissen	43
Bild 4-1: Beispielhafter instationärer Temperaturverlauf in radialer Richtung bei zylindrischen Körpern	48
Bild 4-2: Temperaturverlauf beim Wärmeübergang vom Fluid auf einen Festkörper zur Verdeutlichung der Konvektions-Randbedingung	57
Bild 4-3: Prinzipieller Querschnitt eines Receiverrohres mit Parabolrinnenspiegel	65
Bild 4-4: Prinzipieller Programmablaufplan für die Simulation der Wandtemperatur	68
Bild 5-1: Verdeutlichung der Spannungen am freigeschnittenen Abzweig	77
Bild 5-2: Spannungs-/Dehnungsverhalten im Betriebszyklus	79
Bild 5-3: Erkennung von Lastwechseln anhand der relativen Extrema der Vergleichsspannung	81
Bild 5-4: Fallunterscheidung für die Bestimmung der maßgeblichen Spannungsschwingbreite	83
Bild 5-5: Anrisszyklenzahl N_A eines ungekerbten Probestabes bei Raumtemperatur ohne Mittelspannung (Mittelwert der Streubreite)	85
Bild 6-1: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)	88

Bild 6-2: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl summiert über die fünf Referenztage für die unterschiedlichen Skalierungsmethoden (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)	90
Bild 6-3: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 1) am 1. Juni 2012	91
Bild 6-4: Restextremwertfolge für die Dampftrömmel (Schnitt 1) am 1. Juni 2012	92
Bild 6-5: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation der Wandstärke des Grundkörpers e_s zwischen 100 bis 200 %	95
Bild 6-6: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 2), 04.06.2012	96
Bild 6-7: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 2) mit 130 % Wandstärke, 04.06.2012	96
Bild 6-8: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des Innendurchmessers d_i zwischen 100 und 150 %	97
Bild 6-9: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (04.06.2012)	99
Bild 6-10: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1, mit 150 % Innendurchmesser (04.06.2012)	100
Bild 6-11: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des Wärmeübergangskoeffizienten α_{innen} zwischen 50 % und 400 % (Zustandsabhängig) und von 100 bis 10 000 W/m ² /K (konstant über der Zeit)	101
Bild 6-12: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten von 10 000 W/m ² /K am 01.06.2012	103
Bild 6-13: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten von 1 000 W/m ² /K am 01.06.2012	103
Bild 6-14: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des SKF für den Innendruck α_m zwischen 100 und 200 %	105
Bild 6-15: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des SKF für die Wandtemperaturdifferenz α_t zwischen 100 und 200 %	106
Bild 6-16: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des Zeitversatzes zwischen der Druck- und Temperaturzeitreihe von - 60 s bis +60 s (positiver Zeitversatz: Druck eilt der Temperatur voraus)	108
Bild A-1: Temperaturmessungen vom 01.05.2012	116
Bild A-2: Druck- und Massenstrommessungen vom 01.05.2012	116
Bild A-3: DNI_{eff} vom 01.05.2012	117
Bild A-4: Temperaturmessungen vom 11.05.2012	117
Bild A-5: Druck- und Massenstrommessungen vom 11.05.2012	118
Bild A-6: DNI_{eff} vom 11.05.2012	118
Bild A-7: Temperaturmessungen vom 21.05.2012	119
Bild A-8: Druck- und Massenstrommessungen vom 21.05.2012	119
Bild A-9: DNI_{eff} vom 21.05.2012	120
Bild A-10: Temperaturmessungen vom 01.06.2012	120

Bild A-11: Druck- und Massenstrommessungen vom 01.06.2012	121
Bild A-12: DN_{eff} vom 01.06.2012	121
Bild A-13: Temperaturmessungen vom 04.06.2012	122
Bild A-14: Druck- und Massenstrommessungen vom 04.06.2012	123
Bild A-15: DN_{eff} vom 04.06.2012	123
Bild B-1: Wärmeschaltbild der skalierten Dampfturbine	124
Bild C-1: Skalierte Drücke vom 01.05.2012	126
Bild C-2: Skalierte Massenströme vom 01.05.2012	126
Bild C-3: Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 01.05.2012	127
Bild C-4: Skalierte Überhitzeremperaturen vom 01.05.2012	128
Bild C-5: Skalierte Drücke vom 11.05.2012	129
Bild C-6: Skalierte Massenströme vom 11.05.2012	129
Bild C-7: Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 11.05.2012	130
Bild C-8: Skalierte Überhitzeremperaturen vom 11.05.2012	131
Bild C-9: Skalierte Drücke vom 21.05.2012	132
Bild C-10: Skalierte Massenströme vom 21.05.2012	132
Bild C-11: Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 21.05.2012	133
Bild C-12: Skalierte Überhitzeremperaturen vom 21.05.2012	134
Bild C-13: Skalierte Drücke vom 01.06.2012	135
Bild C-14: Skalierte Massenströme vom 01.06.2012	135
Bild C-15: Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 01.06.2012	136
Bild C-16: Skalierte Überhitzeremperaturen vom 01.06.2012	137
Bild C-17: Skalierte Drücke vom 04.06.2012	138
Bild C-18: Skalierte Massenströme vom 04.06.2012	138
Bild C-19: Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 04.06.2012	139
Bild C-20: Skalierte Überhitzeremperaturen vom 04.06.2012	140
Bild F-1: Testsimulation mit Innendurchmesser: 1 m, Wandstärke: 100 mm, Wärmeübergangskoeffizient: 1 000 W/m ² /K (innen) und 100 W/m ² /K (außen), Fluid- Außentemperatur: 40 °C, Fluid-Innentemperatur: Sprung von 40 °C auf 100 °C, Anfangsbedingung: 40 °C, Zeitschrittweite: 1 s, Radiuschrittweite: 1 mm	142
Bild F-2: Testsimulation mit Innendurchmesser: 1 m, Wandstärke: 100 mm, Wärmeübergangskoeffizient: 1 000 W/m ² /K (innen) und 100 W/m ² /K (außen), Fluid- Außentemperatur: 40 °C, Fluid-Innentemperatur: Rampe von 40 °C auf 140 °C mit 4 K/Minute, Anfangsbedingung: 40 °C, Zeitschrittweite: 1 s, Radiuschrittweite: 1 mm	143
Bild F-3: Testsimulation mit Innendurchmesser: 1 m, Wandstärke: 100 mm, Wärmeübergangskoeffizient: 1 000 W/m ² /K (innen), Fluid-Innentemperatur: 40 °C, Bestrahlungsstärke: 1 0000 W/m ² , Anfangsbedingung: 40 °C, Zeitschrittweite: 1 s, Radiuschrittweite: 1 mm	143
Bild F-4: Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (01.05.2012)	144
Bild F-5: Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (11.05.2012)	145

Bild F-6: Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (21.05.2012).....	146
Bild F-7: Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (01.06.2012).....	147
Bild F-8: Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (04.06.2012).....	148
Bild F-9: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (01.05.2012)	149
Bild F-10: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (01.05.2012)	150
Bild F-11: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (01.05.2012)	151
Bild F-12: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (11.05.2012)	152
Bild F-13: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (11.05.2012)	153
Bild F-14: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (11.05.2012)	154
Bild F-15: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (21.05.2012)	155
Bild F-16: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (21.05.2012)	156
Bild F-17: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (21.05.2012)	157
Bild F-18: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (01.06.2012)	158
Bild F-19: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (01.06.2012)	159
Bild F-20: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (01.06.2012)	160
Bild F-21: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (04.06.2012)	161
Bild F-22: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (04.06.2012)	162
Bild F-23: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (04.06.2012)	163
Bild F-24: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (01.05.2012).....	164
Bild F-25: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (01.05.2012).....	165
Bild F-26: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (11.05.2012).....	166

Bild F-27: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (11.05.2012)	167
Bild F-28: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (21.05.2012)	168
Bild F-29: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (21.05.2012)	169
Bild F-30: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (01.06.2012)	170
Bild F-31: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (01.06.2012)	171
Bild F-32: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (04.06.2012)	172
Bild F-33: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (04.06.2012)	173
Bild F-34: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (01.05.2012)	174
Bild F-35: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (01.05.2012)	175
Bild F-36: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (01.05.2012)	176
Bild F-37: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (11.05.2012)	177
Bild F-38: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (11.05.2012)	178
Bild F-39: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (11.05.2012)	179
Bild F-40: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (21.05.2012)	180
Bild F-41: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (21.05.2012)	181
Bild F-42: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (21.05.2012)	182
Bild F-43: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (01.06.2012)	183
Bild F-44: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (01.06.2012)	184
Bild F-45: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (01.06.2012)	185
Bild F-46: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (04.06.2012)	186
Bild F-47: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (04.06.2012)	187
Bild F-48: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (04.06.2012)	188
Bild F-49: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (01.05.2012)	189
Bild F-50: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (01.05.2012)	190
Bild F-51: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (11.05.2012)	191
Bild F-52: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (11.05.2012)	192
Bild F-53: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (21.05.2012)	193
Bild F-54: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (21.05.2012)	194
Bild F-55: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (01.06.2012)	195
Bild F-56: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (01.06.2012)	196
Bild F-57: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (04.06.2012)	197
Bild F-58: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (04.06.2012)	198

Bild F-59: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1, mit 150 % Innendurchmesser (04.06.2012)	199
Bild F-60: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1, mit konstantem $\alpha_i = 1\,000\text{ W/m}^2/\text{K}$ (01.06.2012)	200
Bild F-61: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1, mit konstantem $\alpha_i = 10\,000\text{ W/m}^2/\text{K}$ (01.06.2012)	201
Bild G-1: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 2), 01.06.2012	202
Bild G-2: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 2), 04.06.2012	202
Bild G-3: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4), 01.06.2012	203
Bild G-4: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4), 04.06.2012	203
Bild G-5: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 2) mit 130 % Wandstärke am 01.06.2012	204
Bild G-6: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 2) mit 130 % Wandstärke am 04.06.2012	204
Bild G-7: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit 150 % Innendurchmesser am 01.06.2012	205
Bild G-8: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit 150 % Innendurchmesser am 04.06.2012	205
Bild G-9: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten von $1\,000\text{ W/m}^2/\text{K}$ am 01.06.2012	206
Bild G-10: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten von $10\,000\text{ W/m}^2/\text{K}$ am 01.06.2012	206
Bild G-11: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 1) mit 20 % erhöhtem SKF α_m am 01.06.2012	207
Bild G-12: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 1) mit 20 % erhöhtem SKF α_m am 04.06.2012	207

Abkürzungen

BOP	Balance of Plant
CSP	Concentrated Solar Power
DGL	Differenzialgleichung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNI	Direct Normal Irradiation
DQ	Differenzenquotient
DT	Dampftrommel
FD	Frischdampf
FDL	Frischdampfleitung
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
HCF	High-Cycle-Fatigue / hochzyklische Ermüdung
IAPWS	International Association for Properties of Water and Steam
IF97	Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam
LCF	Low-Cycle-Fatigue / niederzyklische Ermüdung
NPSH	Net-Positive-Suction-Head/ Haltedruckhöhe
SKF	Spannungskonzentrationsfaktor
ÜH	Überhitzer
ÜHS	Überhitzersammler
VGB	Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.

Symbole und Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

A_{Ap}	Aperturfläche
A_{fs}	tragende Fläche des Grundkörpers
A_{fb}	tragende Fläche des Abzweigs
A_p	wirksame Druckfläche
C_{g*}	Temperaturkoeffizient für die Ermüdungsberechnung
D	Gesamtschädigung
DNI	direkt-normale Bestrahlungsstärke
DNI_{eff}	direkt-normale Bestrahlungsstärke senkrecht zur Apertur
F	Lastvektor
K	Koeffizientenmatrix
N_A	Anrisszyklenzahl
$N_{A,S}$	maßgebliche Anrisszyklenzahl
Pr	<i>Prandtl</i> -Zahl
Q	thermische Energie
\dot{Q}	Wärmestrom
R	Randbedingungsterm
$R_{p0,2,v}$	Warmdehngrenze bei der Temperatur v
$R_{mT,v}$	Zeitstandfestigkeit für T Stunden bei der Temperatur v
Re	<i>Reynolds</i> -Zahl
U	Lösungsvektor
V	Volumen

Kleine lateinische Buchstaben

a	Temperaturleitfähigkeit
\bar{a}_t	Temperaturleitfähigkeit bei der über dem Radius gemittelten Temperatur zum Zeitpunkt t
b_{Ap}	Breite des Kollektorspiegels (Aperturweite)
c	Wärmekapazität
d_i	Innendurchmesser
d_{is}	Innendurchmesser des Grundkörpers
d_{ib}	Innendurchmesser des Abzweigs
d_{ms}	mittlerer Durchmesser des Grundkörpers
d_{mb}	mittlerer Durchmesser des Abzweigs
e	Wandstärke
e_{rs}	Wandstärke des Grundkörpers

e_{rb}	Wandstärke des Abzweigs
h	spezifische Enthalpie
h'	spezifische Enthalpie der siedenden Flüssigkeit
h''	spezifische Enthalpie des Sattdampfes
k	Konzentrationsfaktor
l	Länge
l_{Ap}	Länge des Kollektorspiegels
l_{rs}	mittragende Länge des Grundkörpers
l_{rb}	mittragende Länge des Abzweiges
\dot{m}	Massenstrom
n	Anzahl der Überhitzerstränge
p	Druck
q	längenbezogene thermische Energie
\dot{q}	Wärmestromdichte / längenbezogener Wärmestrom
r	Radius
t	Zeit
v	spezifisches Volumen
w	Geschwindigkeit des Dampfes

Große griechische Buchstaben

$B_{i,t}$	Temperaturleitkoeffizient i zum Zeitpunkt t
$\Gamma_{+,r}$	rechtsseitiger Geometrikoeffizient am Ort r
$\Gamma_{-,r}$	linksseitiger Geometrikoeffizient am Ort r
ΔD_i	inkrementelle Schädigung eines Lastwechsels
Δp	Differenzdruck
$A_{i,t}$	Wärmeüberleitkoeffizient i zum Zeitpunkt t

Kleine griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient
α_{m}	Spannungskonzentrationsfaktor für den Innendruck
α_{t}	Spannungskonzentrationsfaktor für die Temperaturdifferenz
ε	Wandstärkenverhältnis
η_{K}	Kollektorgesamtwirkungsgrad
δ_{i}	Verhältnis der Innendurchmesser
δ_{m}	Verhältnis der mittleren Durchmesser
ϑ	Temperatur
$\vartheta_{t,r}$	Temperatur zum Zeitpunkt t am Ort r

$\vartheta_{t,0}$	Temperatur am Innenrand des Bauteils
$\bar{\vartheta}_t$	mittlere Wandtemperatur des Bauteils zum Zeitpunkt t
ϑ_*	maßgebliche Temperatur des Lastwechsels
ϑ_o	größerer Temperaturwert des Extremwertpaares
ϑ_u	kleinerer Temperaturwert des Extremwertpaares
λ	Wärmeleitfähigkeit
$\bar{\lambda}_t$	Wärmeleitfähigkeit bei der über dem Radius gemittelten Temperatur zum Zeitpunkt t
ν	Querkontraktionszahl und kinematische Viskosität
ζ	Modifikator für Zeitdiskretisierungsverfahren
ρ	Dichte
σ	Zug-/Druckspannung
σ_a	maßgebliche Spannungsschwingbreite
$\sigma_{a,\vartheta*}$	maßgebliche temperaturkorrigierte Spannungsschwingbreite
σ_o	größerer Spannungswert des Extremwertpaares
σ_u	kleinerer Spannungswert des Extremwertpaares
σ_{mittel}	mittlere Spannung des Lastwechsels
$\sigma_{\text{tan,p},t}$	Tangentialspannung infolge des Innendruckes zum Zeitpunkt t
$\sigma_{\text{tan,th},t}$	thermische Tangentialspannung zum Zeitpunkt t
σ_v	Vergleichsspannung
σ_{va}	Spannungsschwingbreite des Lastwechsels
σ_{zul}	zulässige Spannung
φ	Segmentwinkel

Indizes

außen oder a	an der Außenseite des Bauteils
DT	Dampftrommel
FD	Frischdampf
fluid	im Fluid
innen oder i	an der Innenseite des Bauteils
längs	in Längsrichtung
n	Anzahl der Ortsschritte bei der Diskretisierung
t	Laufvariable für die Zeit
tan	in tangentialer Richtung
r	Laufvariable für den Ort
rad	in radialer Richtung
ref	in der Referenzanlage
s	Siedezustand
sk	bei der skalierten Anlage

strang	bezogen auf einen Strang (Überhitzerstrang)
ÜH	über den Überhitzer
uv	im unverschwächten Bereich
+	Funktionswert am nächsten Schritt (z.B. $r_+ = r + \Delta r$)
-	Funktionswert am vorherigen Schritt (z.B. $t_- = t - \Delta t$)
∞	in der ungestörte Strömung

1 Einleitung

1.1 Solarthermische Anlagen zur Stromerzeugung

Die erstmalige Nutzung von Sonnenenergie in Kraftwerken geht auf den Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts zurück. Die damals errichteten Demonstrationsanlagen hatten jedoch mit technischen Schwierigkeiten zu kämpfen und es dauerte bis zur Mitte der 80er Jahre bis die ersten großtechnischen Anlagen zur Stromerzeugung gebaut wurden. Die Ölkrise in den Jahren zuvor ließ die Preise für Energie stark ansteigen und es wurden in den USA die legislativen Grundsteine für eine gesicherte Einspeisung und Vergütung für solche Kraftwerke gelegt, sodass diese wirtschaftlich wurden. Das Solar Energy Generating System, kurz SEGS, in den USA ist 1984 in Betrieb gesetzt worden und wurde seitdem erweitert. Es handelt sich dabei um ein Kraftwerk mit Parabolrinnenkollektoren. Dabei wird die Sonnenstrahlung durch parabolisch geformte Spiegel auf ein Absorberrohr konzentriert. In diesem Fall spricht man von Linienkonzentratoren. Dazu gehören auch Fresnelkollektoren, bei denen die Spiegelfläche nicht geschlossen ist, sondern aus mehreren verteilten Spiegelsegmenten besteht (vgl. Bild 1-1).

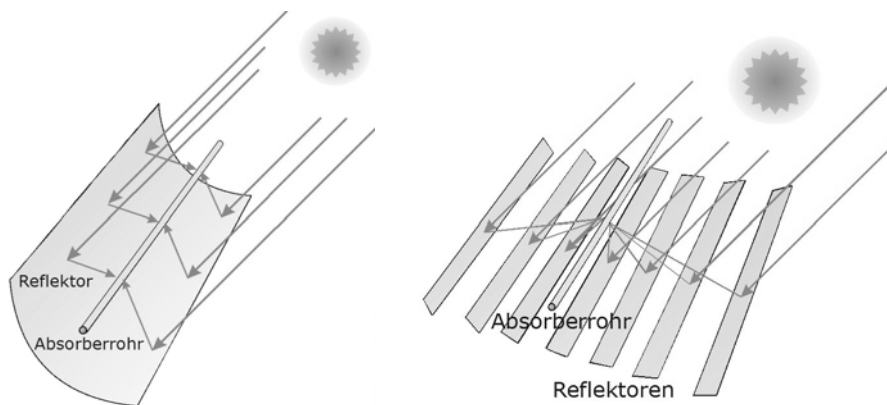


Bild 1-1: Konzentration von Solarstrahlung mit Linienkonzentratoren (links: Parabolrinne, rechts: Fresnelkollektor), Quelle: Quaschnig (2013)

Das durch das Absorberrohr gepumpte Medium zur Aufnahme der thermischen Energie besteht in den SEGS-Kraftwerken sowie den Andasol-Anlagen in Spanien aus Thermoöl (Seitz, 2012). Die Austrittstemperaturen des Absorbers sind durch die thermische Stabilität des Öls auf knapp 400 °C begrenzt. Um den Wirkungsgrad des

Systems zu steigern werden daher andere Wärmeträger erforscht und erprobt. Eines davon sind Salzschnmelzen, die bis zu Temperaturen von 600 °C eingesetzt werden können. Eine weitere Möglichkeit die thermische Energie in den Kraftwerksblock zu transportieren ist durch die Direktverdampfung gegeben. Hierbei wird das Speisewasser direkt in den von der Solarstrahlung beheizten Absorberrohren verdampft und – je nach Anlage – überhitzt und danach der Dampfturbine zugeführt. Dabei entfällt der beim Thermoöl und bei der Salzschnmelze notwendige Dampferzeuger in Form von Wärmetauschern und die Frischdampftemperaturen können theoretisch bis zu den heute üblichen Materialgrenzen gesteigert werden. Bild 1-2 zeigt die prinzipielle Verschaltung bei einem Parabolrinnenkraftwerk mit Thermoöl.

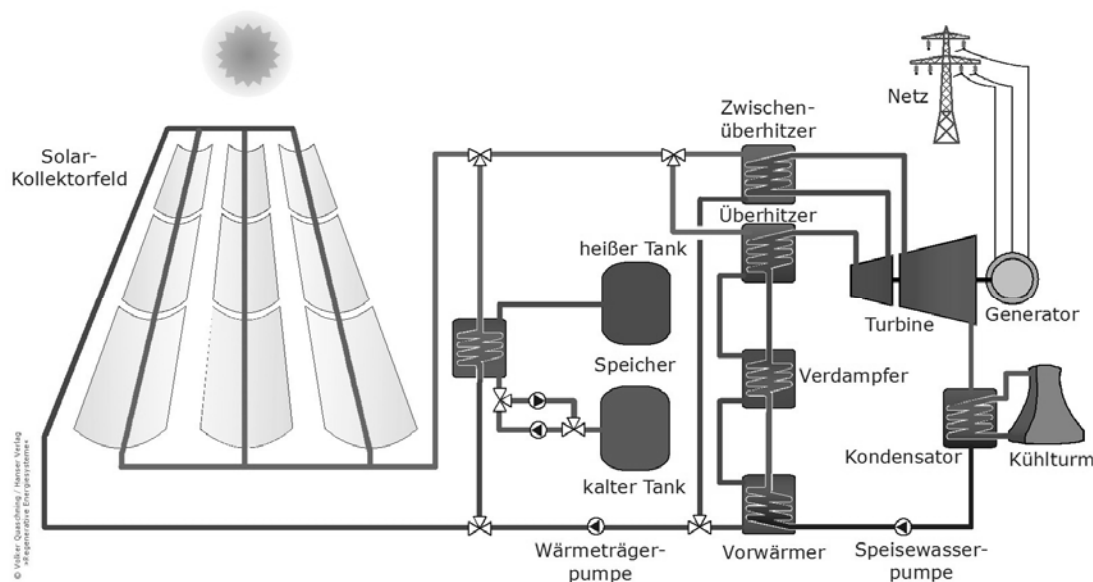


Bild 1-2: Prinzip eines Parabolrinnenkraftwerks mit Thermoöl als Wärmeträgermedium, Quelle: Quaschnig (2013)

Ein Vorteil der Direktverdampfung gegenüber den Salzschnmelzen ist, dass keine Vorkehrungen gegen Erstarrung des Wärmeträgermediums in der Nacht und beim Anlagenstillstand getroffen werden müssen. Die Erstarrungstemperatur liegt je nach Salzschnmelzen weit über 100 °C. Dagegen werden an Anlagen mit Direktverdampfung hohe Anforderungen an die Regelung gestellt, da sich Änderungen der Bestrahlungsstärke direkt auf die Dampfparameter auswirken. Darüber hinaus muss das Solarfeld für den hohen Druck des Wasserdampfkreislaufs ausgelegt werden.

Kommerzielle Parabolrinnenanlagen mit Salzschnmelzen als Wärmeträgermedium sind noch nicht in Betrieb. Die Technologie befindet sich zurzeit in der Erforschung. Die Direktverdampfung wurde neben der Erprobung durch das DLR auf der Plataforma Solar de Almería/Spain bereits in zwei kommerziellen Anlagen realisiert. Es handelt sich dabei um das Fresnel-Kraftwerk PE-2 im spanischen Murcia mit einer elektrischen Leistung von 2x15 MW und das Parabolrinnenkraftwerk TSE-1 mit einer elektrischen Leistung von 5 MW, das in Kanchanaburi/Thailand errichtet wurde (Feldhoff, 2013). Erstere Anlage arbeitet mit Sattedampf, in der zweiten Anlage wird der Dampf überhitzt. Beide Anlagen sind seit 2012 in Betrieb. Die vom DLR zur Verfügung gestellten Messdaten aus dem Kraftwerk in Thailand stellen einen Grundpfeiler dieser Arbeit dar.

Neben der Linienkonzentrierung existieren auch Kraftwerke mit Punktkonzentratoren. Bei größeren Anlagen dieses Typs wird das Sonnenlicht durch zweiachsig nachgeführte Spiegel, den sogenannten Heliostaten, auf einen Punkt konzentriert. Der in diesem Punkt angeordnete Absorber befindet sich in einiger Höhe und ist zumeist in einen Turm integriert, um den herum die Heliostaten angeordnet sind. Punktkonzentratoren bieten gegenüber Linienkonzentratoren die Möglichkeit höhere Konzentrationsfaktoren zu erreichen. Zu den kommerziellen Anlagen gehören die Kraftwerke PS10 (10 MW) und PS20 (20 MW) in Spanien, die beide als Direktverdampfer mit Sattedampf betrieben werden (Quaschnig, 2013). Das kürzlich in Betrieb genommen Turmkraftwerk Ivanpah in den USA zählt mit rund 3x130 MW elektrischer Leistung zu den größten Solarkraftwerken der Welt.

1.2 Schadenmechanismen und kritische Komponenten

Bei dem Betrieb von Kraftwerken werden die Bauteile durch unterschiedliche Einflüsse belastet. Eine Auswahl der wesentlichen Schadensmechanismen und der von ihnen betroffenen Komponenten soll hier kurz vorgestellt werden.

Gewaltbruch

Die Streck- oder Dehngrenze eines Werkstoffes charakterisiert die Grenze seines elastischen Verhaltens. Jenseits dieser Grenze beginnt der Werkstoff zu fließen bzw.

sich irreversibel zu verformen. Bei Überschreitung der Zugfestigkeit bzw. der Bruchfestigkeit ist mit einem zeitlich sehr schnell ablaufenden Schaden zu rechnen. Bei steigender Temperatur sinkt die Festigkeit eines Werkstoffes, gleichfalls nimmt die charakteristische Ausprägung der Streckgrenze ab. Die Festigkeit des Werkstoffes wird durch Fehler im Gefüge oder bereits vorhandene Vorschädigungen (z.B. Risse) geschwächt. Aus diesem Grund und da die exakte Belastung oft nicht bestimmbar ist, wird die Streckgrenze mit entsprechenden Sicherheitsbeiwerten versehen, um die für das betreffende Bauteil zulässigen Belastung zu berechnen. Während des Betriebs von Kessel- und Dampfturbinenanlagen müssen die Bauteile einem gewissen Differenzdruck standhalten, der zwischen ihrer Außen- und Innenseite herrscht. Überschreitet dieser Druck einen bestimmten Wert, so müssen umgehend Gegenmaßnahmen zur Senkung des Druckes eingeleitet werden, die aus sicherheitstechnischen Gründen automatisch und fehlersicher ansprechen müssen. Hierbei steht die Sicherheit des Personals im Vordergrund. Gewaltbrüche gilt es in jedem Fall zu vermeiden. Die obere Grenze wird dabei klar durch die Konstruktion definiert, unabhängig davon um welche Anlage es sich handelt.

Eine häufige Ursache für das Versagen von Bauteilen sind Dampfschläge. Hierbei werden große Mengen Dampf abgekühlt und kondensieren schlagartig mit entsprechender Volumenverringering. Die daraus entstehenden Druckschwankungen stellen eine hohe Beanspruchung der Bauteile dar. Beim Betrieb von solarthermischen Anlagen mit Direktverdampfung können Dampfschläge kritisch werden, wenn z.B. der Verdampfer nach einer Phase niedriger Bestrahlungsstärke wieder erhöhte Mengen Dampf produziert und diesen in die Dampftrommel speist.

Kriecherschöpfung

Bei hohen Temperaturen kommt es in einem unter Spannung stehenden Bauteil zu einer bleibenden Verformung, die mit der Zeit zunimmt (bzw. nimmt die Spannung bei gedehnten Bauteilen mit der Zeit ab). Bei Kunststoffen ist dieses Verhalten bereits bei Raumtemperatur zu beobachten. Bei denen im Kraftwerks- und Turbinenbau eingesetzten Werkstoffen tritt das sogenannte Kriechen im technisch relevanten Maßstab ab Temperaturen von etwa 250°C auf (VGB-R 105 M, 1990). Die Verformung nimmt stetig zu, bis das Bauteil letztendlich versagt. Üblicherweise wird die

Zugfestigkeit eines Werkstoffes gegenüber Kriechen als ertragbare Spannung über der Temperatur als sog. Zeitbruchlinie im Zeitstandfestigkeitsdiagramm aufgetragen (Traupel, 2001). Die Bauteile, die bei entsprechend kritischen Temperaturen betrieben werden, müssen auf die geplante Lebensdauer ausgelegt sein. Da es sich hierbei um einen sehr langsamen Schädigungsmechanismus handelt, zielt die rechnerische Betrachtung der Kriecherschöpfung auch auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage ab. Die rechnerische Schädigung liefert nur Näherungswerte für die Restlebensdauer der Komponenten. Um eine verlässliche Aussage darüber zu bekommen, müssen die Bauteile beispielsweise einer Rissprüfung unterzogen werden. Dies bedeutet, dass die Anlage abgeschaltet und abgekühlt werden muss. Die rechnerische Schädigungsermittlung hilft die Anlagenstillstände zur Bauteilprüfung zu planen. Damit können unnötige Stillstände vermieden werden. Im wesentlichen ist die Kriecherschöpfung bei der Auslegung von Komponenten anhand der geforderten Lebensdauer und der Frischdampfparameter beherrschbar. Sie stellt in dem Sinne bei solarthermischen Kraftwerken mit Direktverdampfung keine besondere Gefährdung dar.

Ermüdung

Wird ein Bauteil einer wiederkehrenden wechselnden Belastung unterzogen, so kann es zu einer Schädigung kommen. Hierbei wird bei niedrigen Temperaturen häufig zwischen Zeitschwing- und Dauerschwingfestigkeit unterschieden. Bei höheren Temperaturen existiert theoretisch keine Dauerschwingfestigkeit und es findet eine Unterscheidung in niederzyklische und hochzyklische Ermüdung statt, wobei die Literatur in manchen Fällen den zusätzlichen Begriff der thermischen Ermüdung nennt (Bürgel, 2006). Bei der hochzyklischen Ermüdung oder high-cycle-fatigue (HCF) sind die Dehnamplituden eher gering, sodass eine hohe Lastspielzahl erreicht wird. Man ordnet diesem Begriff Zyklenzahlen oberhalb von 10^4 und 10^5 zu. Daher ist die HCF eher bei rotierenden Bauteilen, also bei Maschinen, relevant und nicht bei Bauteilen, die ausschließlich durch die Prozessgrößen wie Druck, Temperatur und Massenstrom belastet werden. Bei großen Dehnamplituden sinkt die ertragbare Lastzyklenzahl und man spricht von der niederzyklischen Ermüdung oder low-cycle-fatigue (LCF). Hierbei tritt an Stellen hoher Spannung eine wiederkehrende abwechselnde Stauchung und Dehnung bis in den plastischen Bereich ein, die mit der Zeit zu einer Schädigung und letztendlich zur Rissbildung führt. Ergänzend dazu

behandelt die thermische Ermüdung den Einfluss der Temperaturspannungen. Beide sind für die Bauteile eines Kraftwerkes von großer Bedeutung, da sowohl der Druck als auch die Temperatur regelmäßigen Schwankungen unterworfen sind. Durch die mitunter ständig wechselnde Bestrahlungsstärke sind solarthermische Kraftwerke mit Direktverdampfung besonders hohen Schwankungen unterworfen, denn die äußeren Einflüsse sind kaum durch Regeleingriffe beeinflussbar. Diese Einflüsse sind bei der Auslegung nur bedingt abschätzbar. Zwar sind die Vorgänge, wie Kaltstart und Warmstart, sowohl in ihrer Belastung als auch in ihrer Häufigkeit zum Zeitpunkt der Auslegung weitestgehend bekannt. Die Schwankungen im Betrieb sind hingegen unklar. Diese Arbeit konzentriert sich daher auf die LCF und die thermische Ermüdung, wobei später beides unter dem Begriff LCF abgehandelt wird. Von der LCF betroffen sind im Kraftwerk in erster Linie die dickwandigen Bauteile wie Kesseltrommel, Sammler, Turbinengehäuse und -rotor.

Festkörperreibung

Überall dort, wo die für Turbomaschinen typischen Relativgeschwindigkeiten zwischen Bauteile auftreten, sind gewisse Spalte und Spiele einzuhalten, um ein Anstreifen dieser Teile auszuschließen. Die Folgen von Festkörperreibung reichen vom einfachen Materialabtrag über Verformung und Bruch bis hin zum Verschweißen von Rotor und Stator und damit zum Totalschaden. Die Ursache für das Anstreifen von Bauteilen ist demnach das Überbrücken von konstruktiv vorgegebenen Spalten und Spielen entweder aufgrund von freier Temperaturdehnung, Dehnung durch innere und äußere Kräfte und/oder das Überschreiten von Lagertragfähigkeiten. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen unvermeidbaren Ermüdungs- und Erschöpfungsmechanismen handelt es sich hierbei um einen vermeidbaren Schädigungsmechanismus, der jedoch bei solarthermischen Kraftwerken keine außergewöhnliche Relevanz besitzt.

Erosion durch Nassdampf

Bei sehr hohen Fluidgeschwindigkeiten im Nassdampfgebiet kommt es infolge der kinetischen Energie der Wassertropfen zu Materialabtragungen an den angeströmten Bauteilen. Der Materialabtrag wiederum schwächt das Bauteil, was zum Versagen

führen kann. Dieser Effekt wird durch ungünstige Anströmwinkel und durch unzureichende Dampfqualität verstärkt. Ein sehr reiner Dampf hingegen, der heutzutage in Kraftwerken üblich ist, erfährt infolge der fehlenden Kondensationskeime eine Unterkühlung bevor er dann plötzlich mit verstärkter Intensität kondensiert (Dietzel, 1980). Von der Erosion betroffen sind hauptsächlich die letzten Stufen einer Kondensationsdampfturbine. Dabei sind im Wesentlichen zwei Faktoren zu nennen: der Kondensatordruck sowie die Überhitzung am Eintritt. Der Kondensatordruck hängt in erster Linie von der Kühlung ab. Er sollte von Schwankungen der Bestrahlungsstärke - abgesehen von den daraus hervorgehenden Lufttemperaturschwankungen - weitestgehend entkoppelt sein. Dagegen wird die Überhitzung des Dampfes am Eintritt der Turbine von den Schwankungen des Prozesses beeinflusst.

Erosion durch Kavitation

Nähert sich der absolute Druck eines strömenden Fluides seinem Dampfdruck bzw. unterschreitet diesen kommt es zur Bildung von Kavitationsblasen, die mit sehr hoher Geschwindigkeit implodieren und dabei Bauteile infolge von Erosion angreifen. Kavitation tritt hauptsächlich dort auf, wo das Fluid enge Strömungsquerschnitte passiert. Dort sinkt der absolute Druck infolge der hohen Strömungsgeschwindigkeiten und die Wandreibungsverluste steigen. Gefährdet sind damit insbesondere Schaufeleintrittskanten von Pumpenlaufrädern und Drosselorgane in Armaturen.

Für den Betrieb eines solarthermischen Kraftwerkes in Bezug auf Kavitation in Pumpen dürfte die transiente Druckabsenkung in den Behältern mit siedender Flüssigkeit eine wichtige Rolle spielen. Hierbei bleibt bei Lastabsenkung die Temperatur der flüssigen Phase aufgrund der Trägheit nahezu konstant, während der Druck absinkt. Dadurch verringert sich der vorhandene NPSH und es kann zur Kavitation kommen (Gülich, 2004). Diesem Effekt kann konstruktiv entgegen gewirkt werden, z.B. durch Beimischung kälteren Wassers in die Saugleitung der Pumpe.

1.3 Eingrenzung der Aufgabenstellung

Solarthermischen Parabolrinnenkraftwerke mit Direktverdampfung weisen unter gewissen Konfigurationen bereits heute geringere Stromgestehungskosten auf als thermoölbasierte Anlagen (Feldhoff, et al., 2011). Es ist daher anzunehmen, dass in Zukunft mehr und größere Anlagen von diesem Typ gebaut werden. Dabei sind die gesammelten Erfahrungen unter kritischer Betrachtung zu extrapolieren, um den Schritt erfolgreich gehen zu können. Eine dieser kritischen Betrachtungen stellt diese Arbeit dar. Dabei gilt es herauszufinden, ob die Komponenten eines solarthermischen Kraftwerkes mit Direktverdampfung besonders zu berücksichtigender Belastungen ausgesetzt sind. Bei dieser Fragestellung wird allein der Aspekt der niederzyklischen und thermischen Ermüdung betrachtet, da diese hauptsächlich durch das beeinflusst wird, was ein solches Kraftwerk von konventionellen Anlagen unterscheidet. Um dies zu erreichen, werden die gesammelten Erfahrungen in Form von Messdaten aus einem Referenzkraftwerk auf die zu untersuchende Anlagengröße skaliert. Die grundlegende Fragestellung hierbei ist, wie sich die Prozessdaten eines größeren Kraftwerks im ungünstigsten Fall verhalten (siehe Kapitel 2). Mit der Kenntnis über die maßgeblichen Parameter wird eine Auswahl und Auslegung der Bauteile vorgenommen. Dies geschieht in Anlehnung an internationale Standards, die es bei konventionellen Anlagen zu berücksichtigen gilt. Die Leitfrage dabei lautet, welche Hauptabmessungen die Komponenten in einer Anlage der betrachteten Größe aufweisen und aus welchen Materialien sie bestehen (siehe Kapitel 3). Im Anschluss daran wird ein numerisches Modell entwickelt, das das transiente Temperaturverhalten der Bauteile wiedergibt. Es wird die Antwort auf die Frage gesucht, welche Temperaturunterschiede die Bauteilwand erfährt, wenn man das Bauteil in einem solchen Kraftwerk betreibt (siehe Kapitel 4). Aus der Kenntnis des Druckverlaufs und der Wandtemperaturunterschiede wird dann unter Anwendung internationaler Standards die Schädigung errechnet (siehe Kapitel 5 und 6). Somit wird die Extrapolation vor dem Hintergrund einer gesicherten technischen Sachlage betrachtet. Abschließend wird erörtert und zusammengefasst, ob und inwieweit Bauteile eines solarthermischen Kraftwerks mit Direktverdampfung in besonderem Maße von niederzyklischer bzw. thermischer Ermüdung betroffen sind und welche Möglichkeiten sich daraus ergeben (Kapitel 7).

2 Skalierung der Messwerte

2.1 Beschreibung der Referenzanlage und deren Messwerte

Im Jahr 2012 wurde eines der ersten kommerziellen solarthermischen Parabolrinnenkraftwerke mit Direktverdampfung in seiner ersten Ausbaustufe in Betrieb genommen. In dieser Stufe ist das Kraftwerk am Standort Kanchanaburi/Thailand für eine elektrische Leistung von 5 MW ausgelegt. Eine zweite Ausbaustufe sieht eine Erweiterung auf 9 MW vor. Als Generalunternehmer des Kraftwerks und Lieferant für die Solarkollektoren ist die Firma Solarlite GmbH aufgetreten (Krüger, et al., 2010). Diese Anlage besteht aus einem Verdampfer mit Zwangsumlauf und Dampftrommel, sowie einem Überhitzer. Zur Regelung der Dampftemperatur und zum Schutz der Rohre vor Überhitzung werden die Kollektoren teilweise defokussiert, wobei zusätzlich Einspritzkühler vorgesehen sind (Krüger, et al., 2012). Im Rahmen des DISS Projektes wurden vom DLR mehrere für die Direktverdampfung in Parabolrinnenkraftwerken in Frage kommende Verschaltungsvarianten erprobt. Neben dem Zwangsumlauf wurden auch der Zwangsdurchlauf sowie der Zwangsdurchlauf mit Einspritzung getestet. Die Resultate ergaben, dass der Zwangsumlauf generell den anderen Varianten in den Punkten Regelbarkeit und Verfügbarkeit überlegen sei (Eck, et al., 2002). Bild 2-1 zeigt die prinzipielle Verschaltung von Verdampfer und Überhitzer im Referenzkraftwerk.

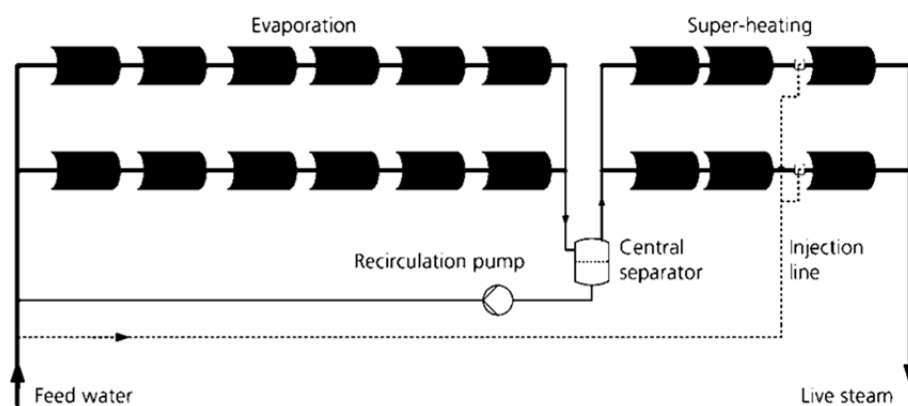


Bild 2-1: Prinzipielles Verschaltungsschema von Verdampfer und Überhitzer im Referenzkraftwerk, Quelle: Hirsch, et al. (2013)

Der Verdampfer besteht aus zwölf parallel durchströmten Kollektorsträngen mit einer jeweiligen Länge von etwa 720 m. Der Überhitzer besteht aus sieben parallelen Strängen mit einer Länge von je 240 m. Dabei kommen sowohl bei dem Verdampfer als auch dem Überhitzer Parabolrinnenkollektor-Module des gleichen Fabrikats zum Einsatz. Jedes Modul besitzt eine Länge von 12 m und eine Aperturweite von 4,6 m. Die gesamte Kollektorfläche beträgt damit 45.000 m² (Feldhoff, et al., 2013). Der Außendurchmesser des Absorberrohres beträgt 70 mm. Um das Absorberrohr befindet sich zur Verringerung der thermischen Verluste ein evakuiertes Glashüllrohr. Ein solches Absorberrohr ist in Bild 2-2 zu sehen.



Bild 2-2: Foto eines Hochtemperaturabsorberrohres mit Glashüllrohr, Quelle: Quaschnig (2013)

Die Frischdampfparameter dieses Kraftwerkes liegen bei 30 bar und 330 °C, wobei eine Entnahmekondensationsturbine zum Einsatz kommt. Durch die hohe Anzahl von Entnahmen ist ein Frischdampfmassenstrom von etwa 9 kg/s nötig, um die genannte Nennleistung zu erbringen.

Für fünf verschiedene Tage stehen Zeitreihen der wichtigsten Prozessparameter zur Verfügung. Die Abtastrate mit der die Daten erfasst wurden beträgt fünf Sekunden. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Prozessdaten verwendet:

- Temperatur stromaufwärts der Dampftrommel
- Temperatur stromabwärts der Dampftrommel
- Temperatur am Austritt jedes Überhitzerstranges
- Frischdampf Temperatur

- Druck in der Dampftrommel
- Druck stromabwärts der Trommel (im Überhitzerverteiler)
- Frischdampfdruck
- Frischdampfmassenstrom
- Direkt-normale Bestrahlungsstärke

Die Zeitreihen der wichtigsten Messgrößen sind im Anhang A (S. 116 ff.) für alle fünf Tage dargestellt.

2.2 Festlegung des Zielprozesses

Die Untersuchungen in dieser Arbeit sollen anhand einer skalierten Anlage gemacht werden. Als technisch sinnvolle Anlagenleistung wurden 50 MW festgelegt. Um die vorgestellten Messwerte aus der Referenzanlage zu skalieren, ist diese in den wichtigsten Punkten zu beschreiben. Prinzipiell gilt es die in dem Referenzkraftwerk eingesetzten Kollektormodule auch bei der skalierten Anlage zu berücksichtigen. Diese geben eine maximale Prozesstemperatur von 500 °C vor. Der Frischdampfdruck von 130 bar wurde in erster Linie gewählt, um dem Hochdruckteil der Turbine mehr Enthalpiegefälle anbieten zu können. Der Endpunkt des Entspannungsprozesses ist mit einem Dampfgehalt von 0,9 gewählt. Wie bereits erwähnt ist die Erosion durch Wassertropfen an den letzten Schaufelreihen der entscheidende Grund dafür, dass man diesen in der Praxis nicht wesentlich tiefer wählen kann. Da es sich bei solarthermischen Anlagen zumeist um Anlagen in Regionen mit hohen Umgebungstemperaturen und knappen Wasservorkommen handelt, wird angenommen, dass ein Luftkondensator eingesetzt wird, der unter diesen Umständen einen Kondensationsdruck von 0,09 bara gewährleisten kann. Das isentrope Enthalpiegefälle zwischen den oben genannten Frischdampfparametern und dem Enddruck beträgt 1310 kJ/kg, wobei das vorhandene Enthalpiegefälle bei 996 kJ/kg liegt. Dies entspräche einem isentropen Wirkungsgrad von 0,76. Da aber selbst kleinere Dampfturbinen bereits einen größeren isentropen Wirkungsgrad aufweisen, würde man in der Praxis eine Zwischenüberhitzung benötigen. Um die Druckverluste und die hohen Kosten des Solarfeldes zu verringern, sieht die hier

angesetzte Planung vor, eine interne Zwischenüberhitzung zu verwenden. Dabei wird ein Teil des Frischdampfes dazu verwendet, die Überhitzung des teilweise entspannten Dampfes aus der Hochdruckturbine zu steigern. Der benötigte Frischdampfmassenstrom wurde unter den oben genannten Randbedingungen mit Hilfe eines thermodynamischen Modells der Dampfturbine und der Entnahmen bzw. regenerativen Speisewasservorwärmung ermittelt. Dabei stellen sich rechnerisch 58,4 kg/s ein. In dieser Arbeit wird weiter mit 60 kg/s gerechnet, wobei der Massenstrom lediglich bei der späteren Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten eine Rolle spielt.

In Bild 2-3 ist das vereinfachte Prozessschema für den Zielprozess gezeigt. Für die spätere Simulation der Bauteilwandtemperatur und die darauf folgende Schädigungsberechnung müssen die Prozessparameter Druck, Temperatur und Massenstrom an verschiedenen Orten bekannt sein. Die in dieser Arbeit als kritisch betrachteten Komponenten sind die Dampftrommel, das Überhitzerrohr, der Überhitzersammler, sowie die Frischdampfleitung. Daher sind die dort wirkenden Zeitverläufe zu bestimmen.

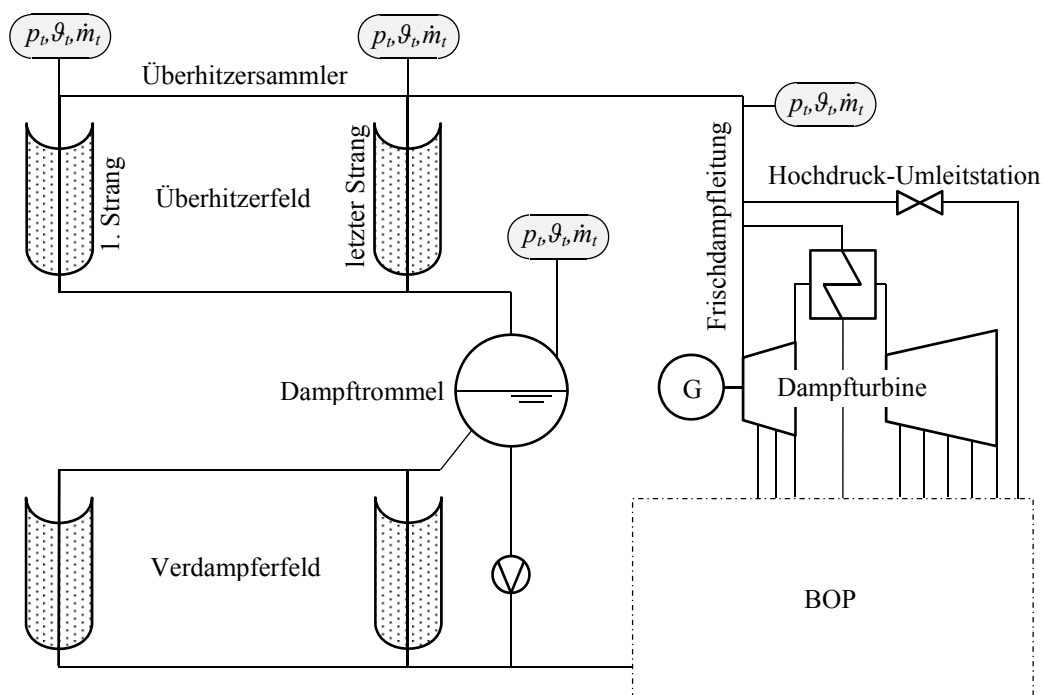


Bild 2-3: Anlagenschema für den skalierten Prozess mit Verdeutlichung der Orte für die gesuchten Prozessparameterverläufe

Ergänzend zu dem Schema in Bild 2-3 ist in Anhang B (S. 124) das Wärmeschaltbild der Turbine mit allen wichtigen Parametern zu sehen. Zusammenfassend sind in Tabelle 2-1 die wichtigsten Eckdaten in der Gegenüberstellung von Referenzkraftwerk und Zielprozess gezeigt.

	Referenzanlage	Zielprozess
Frischdampfdruck	30 bar	130 bar
Frischdampftemperatur	330 °C	500 °C
Frischdampfmassenstrom	9 kg/s	60 kg/s
elektrische Bruttoleistung	5 MW	50 MW

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der Eckdaten von Referenzanlage und Zielprozess

Die Wahl der exakten Werte der Frischdampfparameter ist für die spätere Betrachtung der Spannungen von untergeordneter Bedeutung, da sie bei der Bauteilauslegung in Kapitel 3 berücksichtigt werden. Wichtig für die Betrachtungen in dieser Arbeit ist die Größenordnung, in der sich ein solcher Prozess später bewegen wird. Nicht zuletzt sind bei der Wahl der Frischdampfparameter auch Informationen aus Referenzanlagen eingeflossen, um zum Beispiel die Wahl der Materialien auf eine fundierte Basis zu stellen.

2.3 Skalierung der Prozessdrücke

2.3.1 Zusammenhang von Druck und Massenstrom

Der Druck in einem Dampferzeuger und dem stromabwärts liegenden Überhitzer wird in erster Linie vom Dampfmassenstrom bestimmt. Denn mit dem Massenstrom ändern sich einerseits die Druckverluste in den Rohrleitungen und andererseits stellt sich über den Dampfmassenstrom der Druck vor der Turbine ein. Das sogenannte Kegelgesetz nach *Stodola* beschreibt näherungsweise einen proportionalen Zusammenhang zwischen dem Eintritts-Massenstrom und dem Eintrittsdruck einer Dampfturbine. Dies gilt bei genügend geringem Enddruck der Turbine, was für die hier verwendete Kondensationsdampfturbine der Fall ist (Menny, 2011).

Wie hoch der Dampfmassenstrom eines Umlaufkessels ist, hängt von vielen Faktoren ab. Grundsätzlich führt die dem Verdampfer zugeführte Energie, in diesem Fall die konzentrierte Solarstrahlung, dazu, dass die ihm (dem Verdampfer) zugeführte siedende Flüssigkeit mit einem entsprechenden Dampfgehalt in die Dampftrommel zurückgeführt wird. Die produzierte Dampfmenge ist daher von der Bestrahlungsstärke und der Verdampfungsenthalpie abhängig. Letztere ist vom Druck abhängig. Bei transienten Vorgängen spielt auch die in der Dampftrommel (und im Verdampfer) enthaltene siedende Flüssigkeit eine Rolle, denn bei Absenken des Druckes unter den Siededruck kommt es zu einem Verdampfen des Speisewassers und damit zu einer zusätzlichen Dampfproduktion. Umgekehrt bewirkt eine Erhöhung des Drucks über den Siededruck ein Zusammenfallen von Teilen des Dampfes.

Dampfproduktion bei veränderlicher Bestrahlungsstärke

Die Zusammenhänge bei veränderlicher Bestrahlungsstärke werden anhand eines Beispiels erläutert. Dabei wird zunächst vom stationären Kraftwerksbetrieb ausgegangen, bei dem die Turbine im Gleitdruckbetrieb arbeitet. Kommt es infolge eines Wolkendurchganges über dem Solarfeld zu einer Verringerung der Bestrahlungsstärke, so wandert der Verdampfungspunkt stromabwärts und der Dampfgehalt, der in die Trommel zurück gelangt, wird absinken. Der Anteil der flüssigen Phase steigt, der Dampfmassenstrom sinkt. Den Kegelgesetzen folgend, führt dies dazu, dass sich an der Dampfturbine ein geringerer Gegendruck einstellt. Gleichzeitig sinken auch die Strömungsverluste (im Überhitzer) infolge der geringeren Geschwindigkeiten in den Rohrleitungen. Das Absenken des Druckes im Verdampfer und der Dampftrommel bedingt nun, dass das Speisewasser bereits bei einer geringeren Temperatur verdampft, da sich die Siedetemperatur mit dem Druck ändert. Der oben beschriebenen Verschiebung des Verdampfungspunktes in Strömungsrichtung wirkt dies entgegen. Gleichzeitig vergrößert sich die spez. Verdampfungsenthalpie, was wiederum einen gegenteiligen Effekt hat. Bei niedrigen Drücken (wie zum Beispiel im Falle der Referenzanlage) führt ein Absenken des Druckes unabhängig von der Umwälzzahl zu einem Ansteigen des Dampfgehaltes (vgl. p - h -Diagramm). Da sich bei der hier betrachteten Verschaltung siedende Flüssigkeit in der Trommel befindet (das wahrscheinlich etwas kühlere Speisewasser

wird erst in der Rohrleitung hinzugegeben), wird es bei einer Absenkung des Druckes auch zu einer Teilverdampfung kommen, was wiederum die Dampfproduktion erhöht und dadurch der Druckabsenkung entgegenwirkt. Diese Beschreibung, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat, verdeutlicht, dass Druck und Dampfmassenstrom eines Zwangsumlaufkessels verschiedenen Wechselwirkungen unterlegen sind.

2.3.2 Skalierung des Frischdampfdruckes

Es geht nun darum eine geeignete Methode zu finden, die gemessenen Daten der Referenzanlage zu skalieren, um das Verhalten des Zielprozesses möglichst gut, auf jeden Fall aber in Bezug auf die Änderungsgeschwindigkeiten und Bandbreiten möglichst konservativ zu beschreiben. Referenzanlage und Zielprozess haben gemeinsam, dass auf beide die gleichen Änderungen der Bestrahlungsstärke wirken würden, da diese von äußeren Einflüssen abhängig sind. Da das Speisewasser kurz vor dem Siedepunkt in den Verdampfer eintritt und der Dampfgehalt linear mit der spez. Enthalpieänderung zunimmt, verändert sich die Dampfproduktion des Zielprozesses proportional zur Dampfproduktion der Referenzanlage. Wobei der Proportionalitätsfaktor dem Verhältnis der Auslegungsmassenströme bzw. der Auslegungsdrücke entspricht. Im Gleitdruckbetrieb verhält sich dann auch der Frischdampfdruck des Zielprozesses proportional zum FD-Druck des Referenzkraftwerks. Daher wird der Frischdampfdruck folgendermaßen skaliert:

$$p_{\text{FD,sk},t} = p_{\text{FD,ref},t} \cdot \frac{p_{\text{FD,sk}}}{p_{\text{FD,ref}}} \quad 2.3-1$$

Darin sind:

$p_{\text{FD,sk},t}$	Frischdampfdruck des skalierten Prozesses zum Zeitpunkt t
$p_{\text{FD,ref},t}$	Frischdampfdruck des Referenzkraftwerkes zum Zeitpunkt t
$p_{\text{FD,sk}}$	Auslegungsdruck des skalierten Prozesses (= 130 bara)
$p_{\text{FD,ref}}$	Auslegungsdruck des Referenzkraftwerkes (= 31 bara)

Wie anhand der Messdaten (siehe Anhang A, S. 116 ff.) zu erkennen ist, wird die Anlage sowohl im Festdruck- als auch im Gleitdruckbetrieb gefahren. Bei Anwendung von Gleichung 2.3-1 bei Festdruckbetrieb, wenn also das Turbinenregelventil den Frischdampfdruck regelt, wird an dieser Stelle unterstellt, dass auch der FD-Druck des Zielprozesses im Verhältnis zum Auslegungsdruckverhältnis eingestellt wird. Es handelt sich hierbei nur um eine grobe Näherung, da die Wahl des Druckes letztendlich auch von äußeren Faktoren bestimmt wird. Es wird damit auch unterstellt, dass sich die Regelabweichungen des Turbinenregelventils mit dem Proportionalitätsfaktor vergrößern. Dies wird vom Autor als konservative Annahme gesehen. Der Frischdampfdruck wird hier mit 31 bara verarbeitet, da die Messwerte Druckspitzen bis kurz unterhalb dieses Wertes aufweisen.

2.3.3 Skalierung des Dampftrommeldruckes

Bei der Beschreibung des Druckes in der Dampftrommel müssen die massenstromabhängigen Druckverluste des Überhitzers und aller damit verbundenen Rohrleitungswiderstände berücksichtigt werden. Die Messdaten zeigen, dass der Druck in der Dampftrommel selbst im Festdruckbetrieb aufgrund der Massenstromschwankungen starken Änderungen unterworfen ist. In Bild 2-4 ist dies exemplarisch dargestellt.

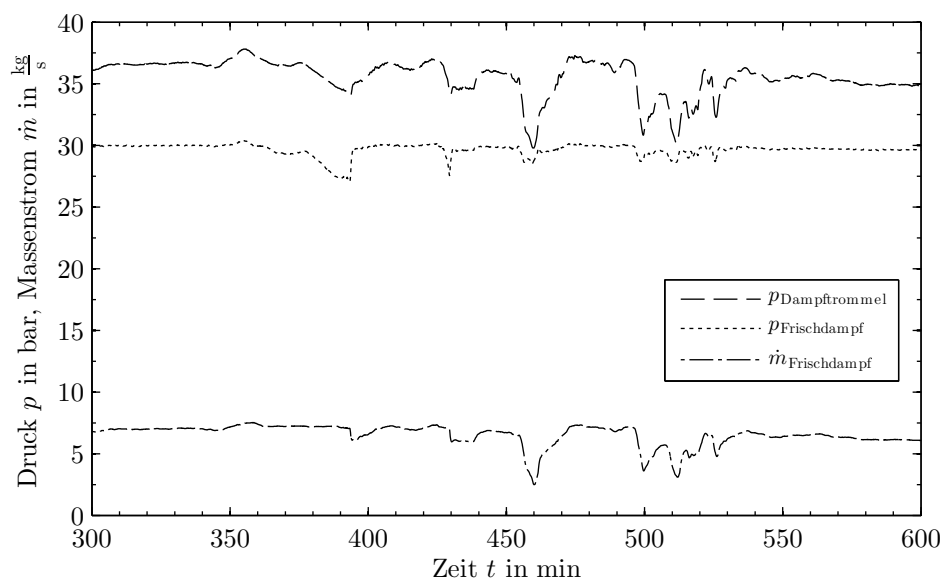


Bild 2-4: Verlauf des Trommeldruckes im Festdruckbetrieb

Dieses Verhalten trifft auch auf den Zielprozess zu. Wie oben festgestellt, gehen die Schwankungen des Massenstroms mit dem Auslegungsmassenstromverhältnis in den Zielprozess ein. Daher ist der Druck in der Dampftrommel von dem Verhältnis der Druckverluste im Überhitzer abhängig.

Unter der Annahme, dass sich die Wärmeübergangskoeffizienten im Überhitzer beider Prozesse nicht wesentlich ändern, ist die Fläche des Solarfeldes des Zielprozesses prinzipiell um den Faktor f größer als die des Referenzkraftwerkes, wobei f gegeben ist durch das Verhältnis der thermischen Netto-Leistungen multipliziert mit dem Massenstromverhältnis:

$$f = \frac{h_{\text{FD,sk}} - h_{\text{sk}}''}{h_{\text{FD,ref}} - h_{\text{ref}}''} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{sk}}}{\dot{m}_{\text{ref}}} \approx 18 \quad 2.3-2$$

Darin sind:

$h_{\text{FD,sk}} - h_{\text{sk}}''$	spez. Enthalpiedifferenz im skalierten Überhitzer (= 726 kJ/kg)
$h_{\text{FD,ref}} - h_{\text{ref}}''$	spez. Enthalpiedifferenz im Referenz-Überhitzer (= 267 kJ/kg)
\dot{m}_{sk}	Massenstrom des skalierten Prozesses (= 60 kg/s)
\dot{m}_{ref}	Massenstrom des Referenzkraftwerkes (= 9 kg/s)

Der Druckverlust Δp in einer Rohrleitung ist abhängig von verschiedenen Parametern (Annaratone, 2008). Bei Unterstellung eines über der Strömungsgeschwindigkeit konstanten Reibungskoeffizienten, ist er proportional zur Rohrleitungslänge l , zum spez. Volumen v und zum Quadrat des Massenstromes \dot{m} :

$$\Delta p \sim l \cdot \rho \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\rho} \right)^2 = l \cdot v \cdot \dot{m}^2 \quad 2.3-3$$

Darin ist ρ die Dichte des Fluids. Mit Gleichung 2.3-3 ist das Druckverlustverhältnis:

$$\frac{\Delta p_{\text{ÜH,sk}}}{\Delta p_{\text{ÜH,ref}}} = \frac{l_{\text{sk}}}{l_{\text{ref}}} \cdot \frac{v_{\text{sk}}}{v_{\text{ref}}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{\text{sk, strang}}}{\dot{m}_{\text{ref, strang}}} \right)^2 = \left(\frac{n_{\text{ref}}}{n_{\text{sk}}} \right)^3 \cdot f \cdot \frac{v_{\text{sk}}}{v_{\text{ref}}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{\text{sk}}}{\dot{m}_{\text{ref}}} \right)^2 \quad 2.3-4$$

Mit:

$\frac{\Delta p_{\text{ÜH,sk}}}{\Delta p_{\text{ÜH,ref}}}$	Druckverlustverhältnis zwischen skalierten und Referenzanlage
$\frac{l_{\text{sk}}}{l_{\text{ref}}}$	Längenverhältnis der Überhitzer
$\frac{n_{\text{ref}}}{n_{\text{sk}}}$	Verhältnis der Anzahl der Überhitzerstränge
$\frac{v_{\text{sk}}}{v_{\text{ref}}}$	Verhältnis der spez. Frischdampf-Volumina beider Prozesse ($\approx 0,28$)
$\frac{\dot{m}_{\text{sk,strang}}}{\dot{m}_{\text{ref,strang}}}$	Verhältnis der Massenströme pro Überhitzerstrang

In Bild 2-5 ist das Druckverlustverhältnis aus Gleichung 2.3-4 über dem Verhältnis der Anzahl der Überhitzerstränge aufgetragen. Darin sind die wachsenden Druckverluste des Verteilers und Sammlers, die linear mit der Anzahl der Stränge zunehmen, nicht dargestellt.

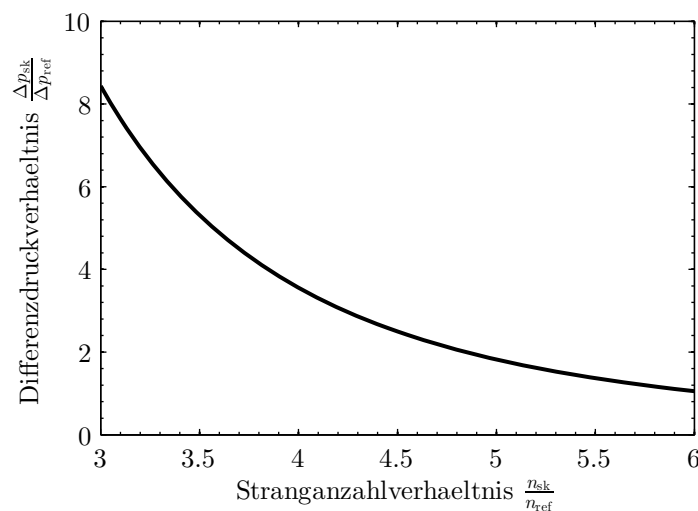


Bild 2-5: Druckverlustverhältnis des Überhitzers bei dem skalierten Prozess in Abhängigkeit des Stranganzahlverhältnisses

Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die skalierte Anlage gleiche Kollektormodule verwendet, was die Betrachtung in Bild 2-5 zulässig macht. Hingegen wird damit gerechnet, dass Verteiler und Sammler wesentlich anders dimensioniert sein werden, was eine absolute Bestimmung des Druckverlustes erschwert. Linear mit der Länge von Verteiler und Sammler nehmen auch die thermischen Verluste zu, sowie die Massen (und damit Kosten). Diese drei Faktoren sprechen gegen ein Solarfeld mit sehr hoher Stranganzahl im Verhältnis zur Länge.

Außerdem wird in vielen Fällen die Form des Grundstückes das Seitenverhältnis mitbestimmen. Das sich ergebende Optimum wird in dieser Arbeit nicht gesucht. Es wird ein Druckverlustverhältnis von 2,5 angenommen. Mit einem Nenndruckverlust von 8 bar, der aus den Messwerten extrahiert wurde, liegt der Druckverlust des skalierten Prozesses zwischen Dampfturbine und Dampftrommel bei 20 bar. Dies kann mit konventionellen Anlagen in Übereinstimmung gebracht werden. Der Auslegungsdruck der Dampftrommel beträgt dann 150 bar. Die Skalierung aus den Messwerten geschieht dann als Addition der skalierten Frischdampfdrücke und der skalierten Druckverluste:

$$p_{DT,sk,t} = p_{FD,sk,t} + (p_{DT,ref,t} - p_{FD,ref,t}) \cdot \frac{\Delta p_{\dot{U}H,sk}}{\Delta p_{\dot{U}H,ref}} \quad 2.3-5$$

$$\text{mit } \frac{\Delta p_{\dot{U}H,sk}}{\Delta p_{\dot{U}H,ref}} = 2,5$$

Es sei angemerkt, dass bei der Skalierung des Trommeldruckes nicht auf den skalierten Massenstrom zurückgegriffen wird, sondern indirekt auf den Druck, weil der gemessene Massenstrom zu mehr Schwankungen geführt hätte.

2.3.4 Skalierung des Druckes am Austritt des Überhitzers

Die im Abschnitt zum Dampftrommeldruck angestellten Überlegungen in Bezug auf den Druckverlust gelten gleichfalls auch für den Druck am Ende des Überhitzers und im Sammler. Der einzige Unterschied liegt darin, dass die Druckverluste nicht mehr vom Solarfeld, sondern vom Sammler und der dahinter liegenden Rohrleitung abhängen. Es wird vereinfachend angenommen, dass die relevanten Druckverluste 20 % der im oberen Abschnitt festgelegten Gesamtdruckverluste entsprechen:

$$p_{\dot{U}H,sk,t} = p_{FD,sk,t} + (p_{DT,ref,t} - p_{FD,ref,t}) \cdot \frac{\Delta p_{\dot{U}H,sk}}{\Delta p_{\dot{U}H,ref}} \cdot 0,2 \quad 2.3-6$$

2.4 Skalierung der Prozesstemperaturen

2.4.1 Skalierung der Dampftemperatur in der Dampftrommel

Abgesehen vom Aufwärm- und Abkühlprozess, sind Temperatur und Druck im Verdampfer miteinander verknüpft. Theoretisch entspricht die Temperatur des Dampfes in der Trommel dem der Siedetemperatur bei dem anstehenden Druck. Die Messwerte zeigen dennoch eine leichte Überhitzung des Dampfes. Es wird ausgeschlossen, dass ein Teil des Dampfes im Verdampfer überhitzt (gemessene Umlaufzahl > 3). Ursache hierfür könnte der Druckverlust in den Trommeleinbauten sein, der je nach Position der Druckmessung zu einer scheinbaren Überhitzung führt. Darüber hinaus können messtechnische Ursachen in Frage kommen. Der Effekt bleibt hier unberücksichtigt.

Die Dampftrommel ist i.d.R. zur Hälfte mit Flüssigkeit gefüllt. Der Füllstand wird über die Speisewasserpumpen bzw. das Speisewasserregelventil geregelt. Die Temperatur der flüssigen Phase unterliegt einer wesentlich größeren Trägheit als die des Dampfes. Aus diesem Grund ist die für diese Arbeit interessantere Temperatur diejenige des Dampfes. Um die Dampftemperatur zu skalieren, wird die gemessene Dampftemperatur mit dem Verhältnis der momentanen Siedetemperaturen multipliziert:

$$\vartheta_{DT,sk,t} = \vartheta_{DT,ref,t} \cdot \frac{\vartheta_{s,sk,t}}{\vartheta_{s,ref,t}} \quad 2.4-1$$

Damit werden die kleinen Schwankungen, die der gemessene Druck aufweist, aus der Temperatur herausgehalten. Diese Schwankungen hätten sich ergeben, wenn die Siedetemperatur direkt aus dem bereits skalierten Druck verwendet worden wäre. Eine weitere Möglichkeit bestünde in der Verwendung der Siedetemperaturen bei Auslegungsdruck.

2.4.2 Skalierung der Dampftemperatur am Ende des Überhitzers

Die Abscheidung der flüssigen Phase in der Dampftrommel führt dazu, dass der Dampf mit einem Dampfgehalt von nahezu 1 in den Überhitzer eintritt (Doležal,

2001). Die Erhöhung der Enthalpie infolge konzentrierter Solarstrahlung findet nun ausschließlich aufgrund von Temperaturerhöhung statt. Eine Veränderung der Bestrahlungsstärke bewirkt eine Veränderung der Temperatur am Überhitzeraustritt. Sinkt die Bestrahlungsstärke im Vergleich zu den Auslegungsbedingungen, stellt sich eine kleinere spez. Enthalpiedifferenz des Überhitzers ein. Über die Leistungsbilanz des Überhitzerfeldes ist das Verhältnis der momentanen Bestrahlungsstärke $DNI_{\text{ref},t}$ zur Auslegungsbestrahlungsstärke DNI_{ref} mit dem Verhältnis der momentanen Enthalpiedifferenz zur Auslegungsenthalpiedifferenz des Überhitzers $\Delta h_{\text{ÜH,ref},t}$ zu $\Delta h_{\text{ÜH,ref}}$ und dem Massenstromverhältnis verbunden.

$$\frac{DNI_{\text{ref},t}}{DNI_{\text{ref}}} = \frac{\Delta h_{\text{ÜH,ref},t}}{\Delta h_{\text{ÜH,ref}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{ref},t}}{\dot{m}_{\text{ref}}} \quad 2.4-2$$

Dies gilt allgemein, solange man Wirkungsgradänderungen im Teillastbereich außer Acht lässt. Wie bereits bei der Skalierung der Drücke erwähnt wurde, wirken auf die skalierte Anlage die gleichen Schwankungen der Bestrahlungsstärke wie sie bei der Referenzanlage anzutreffen sind. Aus Gleichung 2.4-2 wird damit:

$$\frac{\Delta h_{\text{ÜH,sk},t}}{\Delta h_{\text{ÜH,sk}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{sk},t}}{\dot{m}_{\text{sk}}} = \frac{\Delta h_{\text{ÜH,ref},t}}{\Delta h_{\text{ÜH,ref}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{ref},t}}{\dot{m}_{\text{ref}}} \quad 2.4-3$$

Hierbei bedeutet die Indizierung sk, dass es sich um die Skalierten Prozessdaten handelt. In Abschnitt 2.5 wird gezeigt, dass die momentanen Massenstromverhältnisse beider Anlagen gleich sind, sodass sie aus Gleichung 2.4-3 herausgekürzt werden können. Zusammen mit der Festlegung in Gleichung 2.4-1 ist die momentane spez. Enthalpie am Überhitzerende des skalierten Prozesses:

$$h_{\text{FD,sk},t} = h_{\text{DT,sk},t} + \Delta h_{\text{ÜH,ref},t} \cdot \frac{\Delta h_{\text{ÜH,sk}}}{\Delta h_{\text{ÜH,ref}}} \quad 2.4-4$$

mit:

$h_{\text{DT,sk},t}$ momentane spez. Enthalpie am Dampftrommelaustritt

Die spez. Enthalpien werden über den Druck und die Temperatur gemäß Wasserdampf-tafel (IAPWS IF97) bestimmt. Für den Austritt an der Dampftrommel wird die spez. Enthalpie bei dem momentanen Druck $p_{DT,sk,t}$ unter Annahme eines Dampfgehaltes von 1,0 verwendet. Die so errechnete skalierte spez. Enthalpiedifferenz des Überhitzers führt unter Verwendung des momentanen Druckes am Ende des Überhitzers $p_{ÜH,sk,t}$ auf die Frischdampf-temperatur. Diese Methode führt bei niedrigen Drücken dazu, dass die spez. Enthalpiedifferenz im Verhältnis zur Auslegungsenthalpiedifferenz größer 1 wird, wenn gleichzeitig hohe Temperaturen am Überhitzer gemessen werden, denn Satt-dampf-linie und Isothermen entfernen sich im h,s -Diagramm mit abnehmenden Druck voneinander. Dies kann zum Beispiel beim Anfahren vorkommen, wenn der erste Dampf erzeugt wird und dieser infolge geringer Massenströme und bereits hoher Bestrahlungsstärke im Überhitzer bis an die Auslegungstemperatur gefahren wird. Bei der skalierten Zeitreihe kommt es dann zu unzulässig hohen Temperaturen, die die Auslegungstemperatur des Materials überschreiten. Diese Skalierungsmethode berücksichtigt zwar die physikalischen Vorgänge sinngemäß korrekt, geht aber davon aus, dass das System keinen Regelungseinflüssen unterliegt. In der Praxis würde man den hohen Frischdampf-temperaturen mit einer Defokussierung der Überhitzermodule oder einer Einspritzung begegnen. Grundsätzlich sind in den gemessenen Temperaturverläufen der Überhitzerstränge deutliche Regeleingriffe zu erkennen. Die Kollektoren werden dabei komplett aus dem Fokus gedreht, was zu den großen Temperaturschwankungen führt.

Alternative Frischdampf-temperaturskalierungen

Aus diesem Grund werden zwei weitere Skalierungsmethoden eingeführt, die die Auswirkungen der Schwankungen reduzieren. Der erste der beiden Ansätze geht davon aus, dass die Schwankungen auch beim skalierten Kraftwerk in absoluten Temperaturdifferenzen nicht größer sein werden und es wird die Auslegungstemperaturdifferenz zu der momentanen gemessenen Überhitzeraustrittstemperatur addiert:

$$\vartheta_{FD,sk,t} = \vartheta_{FD,ref,t} + \vartheta_{FD,sk} - \vartheta_{FD,ref} \quad 2.4-5$$

Darin sind:

$\vartheta_{\text{FD,sk},t}$	skalierte Frischdampftemperatur zum Zeitpunkt t
$\vartheta_{\text{FD,ref},t}$	gemessene FD-Temperatur zum Zeitpunkt t
$\vartheta_{\text{FD,sk}}$	FD-Auslegungstemperatur des skalierten Prozesses (= 500 °C)
$\vartheta_{\text{FD,ref}}$	FD-Auslegungstemperatur des Referenzkraftwerks (= 330 °C)

Die zweite Alternative sieht vor, dass sich die Temperaturschwankungen im Verhältnis zu den Auslegungstemperaturen verändern. Die momentane Frischdampftemperatur errechnet sich dann folgendermaßen:

$$\vartheta_{\text{FD,sk},t} = \vartheta_{\text{FD,ref},t} \cdot \frac{\vartheta_{\text{FD,sk}}}{\vartheta_{\text{FD,ref}}} \quad 2.4-6$$

Damit stehen drei verschiedene Methoden zur Skalierung der Frischdampftemperatur zur Auswahl. Würde es sich um ein System ohne jeglichen Regelungseinfluss handeln, wäre die Enthalpieskalierung die erste Wahl, da sie den physikalischen Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und FD-Temperatur wiedergibt. Geht man davon aus, dass alle Schwankungen nur durch bewusste Änderungen hervorgerufen werden, wäre die Auslegungstemperaturdifferenz-Methode vorzuziehen. Die Methode über das Auslegungstemperaturverhältnis liegt dazwischen. Sie vergrößert die Schwankungen ohne extreme Spitzen zu produzieren, die in der Praxis durch Regeleingriffe eliminiert werden würden. Darüber hinaus wird die Betrachtung einer Bilanz über dem Überhitzer vermieden, die zu Inkonsistenzen führt, sobald die Durchlaufzeiten mit in Betracht gezogen werden. Dies soll im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.4.3 Überlegungen zum transienten Verhalten der Temperatur

Allen oben beschriebenen Skalierungsmethoden für die Temperaturen ist gemeinsam, dass sie Trägheiten unberücksichtigt lassen. Es werden teilweise Daten, die zu einem Zeitpunkt an verschiedenen Orten gemessen wurden dazu verwendet, eine momentane Bilanz zu erstellen (vgl. Überhitzeraustritt mit Enthalpieskalierung). Dies ist strenggenommen nicht korrekt. In der Referenzanlage benötigt der Dampf etwa zehn Sekunden, um im Auslegungspunkt den Überhitzer zu passieren. Hinzu

kommen - grob geschätzt - weitere zehn Sekunden für das passieren von Verteiler und Sammler. Es vergehen also etwa 20 Sekunden bis der aus der Dampftrommel ausgetretene Dampf das Turbinenregelventil passiert. Für das Passieren der Überhitzerstrecke des skalierten Prozesses benötigt der Dampf knapp zehnmal so lange. Indem die Leistungsbilanz des Überhitzers aufgestellt wird, kann gezeigt werden, dass die Zeit nur von der spez. Enthalpiedifferenz $\Delta h_{\text{ÜH}}$ und dem spezifischen Volumen, nicht aber von der Kollektorlänge l_{Ap} abhängt:

$$DNI_{\text{eff}} \cdot \eta_{\text{Kollektor}} \cdot b_{\text{Ap}} \cdot l_{\text{Ap}} = \Delta h_{\text{ÜH}} \cdot \dot{m}_{\text{strang}} \quad 2.4-7$$

Mit:

$DNI_{\text{eff}} \cdot \eta_{\text{Kollektor}}$	Nettoleistung des Kollektors bezogen auf die Aperturfläche
b_{Ap}	Breite der Apertur
\dot{m}_{strang}	Massenstrom eines Überhitzerstranges

Mit der Geschwindigkeit des Dampfes w , die sich aus dem Massenstrom, dem Rohrquerschnitt A_{Rohr} und dem spez. Volumen ergibt, kann die Zeit ermittelt werden:

$$t = \frac{l_{\text{Ap}}}{w} = \frac{l_{\text{Ap}} \cdot A_{\text{Rohr}}}{\dot{m}_{\text{strang}} \cdot v} \quad 2.4-8$$

Löst man Gleichung 2.4-8 nach der Länge l_{Ap} auf und setzt sie in Gleichung 2.4-7 ein, so erhält man nach dem Umformen:

$$t = \frac{A_{\text{Rohr}}}{DNI_{\text{eff}} \cdot \eta_{\text{Kollektor}} \cdot b_{\text{Ap}}} \cdot \frac{\Delta h_{\text{ÜH}}}{v} \quad 2.4-9$$

Die Passierzeit im Auslegungspunkt bei einem gegebenen Kollektor ist damit durch die Frischdampfparameter bestimmt, nicht aber durch die Auslegung des Feldes. Durch die Verwendung der gleichen Kollektoren ergibt sich im Verhältnis zur Referenzanlage der oben zitierte Wert:

$$\frac{t_{\text{sk}}}{t_{\text{ref}}} = \frac{\Delta h_{\text{ÜH,sk}}}{\Delta h_{\text{ÜH,ref}}} \cdot \frac{v_{\text{FD,ref}}}{v_{\text{FD,sk}}} = 9,7 \quad 2.4-10$$

Strenggenommen ändert sich infolge des Druckverlustes auch das spez. Volumen über der Überhitzerlänge. Das bleibt hier unberücksichtigt.

Die Passierzeiten im Verteiler und im Sammler hängen wesentlich von den gewählten Durchmessern ab. Bei größeren Anlagen, also bei größeren Solarfeldern, werden längere Verteiler und Sammler benötigt. Durch den damit verbundenen größeren Druckverlust müssen die Strömungsgeschwindigkeiten verringert werden. Beide Parameter, die größere Länge sowie die geringere Geschwindigkeit, vergrößern die Passierzeit. Man kann somit davon ausgehen, dass die Zeit, die der Dampf zum Passieren des Solarfeldes benötigt in dem skalierten Prozess wesentlich größer sein wird als es bei der Referenzanlage der Fall ist. In dieser längeren Zeit werden wesentlich mehr Schwankungen der Bestrahlungsstärke auf den Überhitzer einwirken.

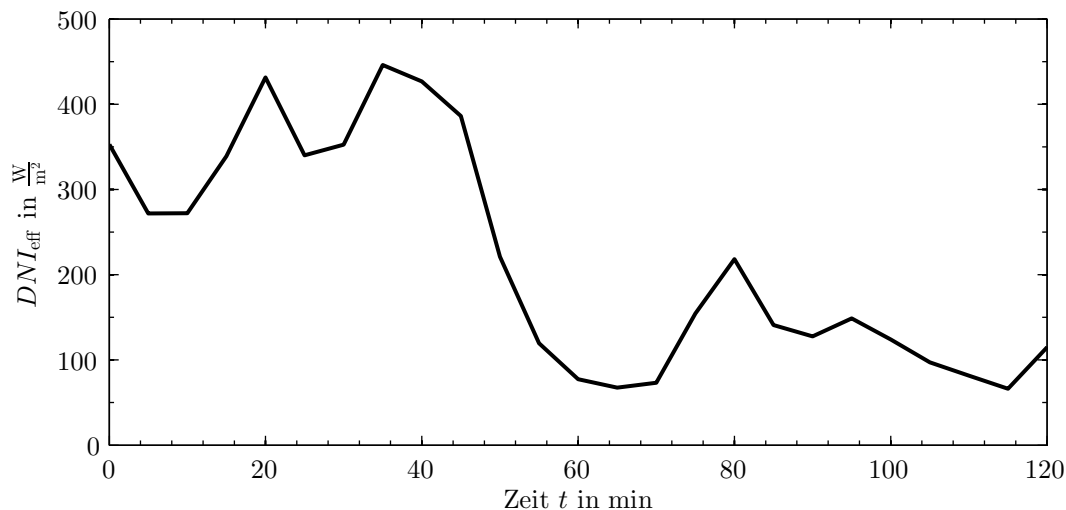


Bild 2-6: Verlauf der gemessenen direkt-normalen Bestrahlungsstärke über einen kurzen Zeitraum

In Bild 2-6 ist exemplarisch ein kurzer Zeitausschnitt dargestellt. Dieser Ausschnitt zeigt, dass die Bestrahlungsstärke innerhalb weniger Sekunden erheblichen Schwankungen unterlegen ist. Eine längere Passierzeit wirkt daher auch dämpfend auf die Frischdampf Temperatur in Bezug auf externe Störungen. Betrachtet man zum Beispiel den Zeitpunkt bei 60 Sekunden (siehe Bild 2-6) und erinnert sich daran, dass

die Passierzeit im Referenzkraftwerk bei Auslegungsmassenstrom etwa 10 Sekunden beträgt, so ist leicht erkennbar, dass der Dampf am Ende des Stranges nicht wesentlich überhitzt sein kann. Bei einer Passierzeit von 90 Sekunden würden diese kurzen Einbrüche weniger stark ins Gewicht fallen.

Eine differenzierte Berücksichtigung der Passierzeit wird bei der Skalierung in dieser Arbeit jedoch nicht vorgenommen. Ein wesentlicher Grund ist, dass zu den oben vorgestellten Überlegungen hinzukommt, dass der Dampf für den äußeren Überhitzerstrang im Vergleich zum inneren Strang längere Zeit für die Zurücklegung der zusätzlichen Verteiler- und Sammlerstrecke benötigt. Es kommt also zwischen den einzelnen Strängen zu unterschiedlichen Phasenverschiebungen, die wiederum vom Massenstrom abhängen. Ein zweiter wichtiger Grund dafür, dass die Passierzeiten bei der Skalierung unberücksichtigt bleiben, sind die in den Messwerten erkennbaren Regeleinflüsse, die die Einflüsse der Passierzeit überlagern.

Schlussendlich wird davon ausgegangen, dass die direkte Skalierung zu einem im Sinne der Komponentenbelastung konservativen Temperaturverlauf führt.

2.5 Skalierung des Massenstromes

Der in der Simulation berechnete Wärmeübergangskoeffizient verwendet den Massenstrom, um auf die Dampfgeschwindigkeit in den Bauteilen zu schließen. Für die Dampftrommel und den Überhitzersammler, also die Bauteile, die von dem gesamten Dampfmassenstrom passiert werden, ist der momentane Massenstrom des skalierten Prozesses $\dot{m}_{sk,t}$ proportional zum gemessenen Massenstrom der Referenzanlage $\dot{m}_{ref,t}$. Hier findet erneut das Kegelgesetz Eingang (Menny, 2011).

$$\dot{m}_{sk,t} = \dot{m}_{ref,t} \cdot \frac{\dot{m}_{sk}}{\dot{m}_{ref}} \quad 2.5-1$$

Dagegen ist der Massenstrom in den Überhitzerrohren abhängig von der Anzahl der Stränge und stellt daher eine Unbekannte dar. Aus der Festlegung des Differenzdruckverhältnisses von 2,5 in Abschnitt 2.3.3 kann man umgekehrt auf die Anzahl

der Überhitzerstränge n_{sk} schließen, die dann bei etwa 32 läge. Der Massenstrom in einem Überhitzerrohr beträgt dann:

$$\dot{m}_{\dot{U}H,sk,t} = \dot{m}_{ref,t} \cdot \frac{\dot{m}_{sk}}{\dot{m}_{ref}} \cdot \frac{n_{ref}}{n_{sk}} \quad 2.5-2$$

Hierbei ist der Massenstrom in den Überhitzerrohren des skalierten Prozesses um den Faktor 1,5 höher als derjenige in der Referenzanlage.

2.6 Verwendete Datensätze in der Übersicht

Die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Skalierungsmethoden sind abhängig von dem betrachteten Bauteil anzuwenden. Dabei können teilweise verschiedene Messorte für die Skalierung herangezogen werden. In dieser Arbeit kommen insgesamt sechs Datensätze zur Anwendung, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Dampftrommel

Der Druck wird wie unter Abschnitt 2.3.3 unter Verwendung des Kesseltrommel-Druckes und des Frischdampfdruckes skaliert. Für die Berechnung der Temperatur des Dampftraumes wird auf die Temperatur am Verdampferaustritt zurückgegriffen, da der Messwert für die Kesseltrommeltemperatur die Temperatur in der Flüssigkeit anzugeben scheint (hohe Trägheit). In den Diagrammen wird für diesen Datensatz auch die Abkürzung DT1 verwendet.

Überhitzer

Für die Simulation des Überhitzerrohres sind drei Datensätze vorgesehen. In allen drei Fällen wird die selbe Druckskalierung gemäß Abschnitt 2.3.4 verwendet, wobei auch hier wieder der Dampftrommeldruck und der Frischdampfdruck eingehen. Die Dampftemperatur wird jeweils mit der Auslegungstemperaturdifferenz ($\dot{U}H1$), mit dem Auslegungstemperaturverhältnis ($\dot{U}H2$) und drittens mit dem spezifischen Enthalpieverhältnis ($\dot{U}H3$) skaliert, wobei in allen drei Fällen die Austrittstemperatur

eines Stranges verwendet wurden (Strang 2). Hier sind die Regeleinflüsse der Defokussierung am deutlichsten.

Überhitzersammler

Auch hierbei geht der Druck wie schon oben beschrieben ein. Die Temperatur wird über das Auslegungstemperaturverhältnis skaliert, wobei in einem Datensatz das Mittel aus allen sieben Temperaturen am Austritt der Überhitzerstränge verwendet wird (ÜHS1). Für den zweiten Datensatz wird die gemessene Frischdampf Temperatur verwendet (ÜHS2).

Tabelle 2-2 listet die sechs Datensätze auf und benennt die für die jeweiligen Größen verwendete Skalierungsgleichung aus diesem Kapitel. Die Diagramme der gemessenen Daten finden sich im Anhang A ab Seite 116. Im Anhang C (S. 125 ff.) sind die skalierten Prozessdaten abgebildet.

Nr.	Bauteile	Größe	Gleichung	verwendete Temperatur
1	Dampftrommel	p g \dot{m}	2.3-5 2.4-1 2.5-1	Dampf Temperatur vor der Trommel
2	Überhitzerrohr und Überhitzersammler (1. Strang)	p g \dot{m}	2.3-6 2.4-5 2.5-2	Austrittstemperatur Strang 2
3		p g \dot{m}	wie Nr. 2 2.4-6 wie Nr. 2	Austrittstemperatur Strang 2
4		p g \dot{m}	wie Nr. 2 2.4-4 wie Nr. 2	Austrittstemperatur Strang 2
5	Überhitzersammler (letzter Strang) und Frischdampfleitung	p g \dot{m}	wie Nr. 2 2.4-6 wie Nr. 1	mittlere Strangaustrittstemperatur
6		p g \dot{m}	wie Nr. 2 2.4-6 wie Nr. 1	Frischdampf Temperatur

Tabelle 2-2: Übersicht über die verwendeten Skalierungsdatensätze und die dafür verwendeten Gleichungen

Das für die Skalierung verwendete MATLAB-Skript ist im Anhang unter Abschnitt G.1 (S. 208 ff.) zu finden. Das Skript liest die entsprechenden Zeitreihen ein, skaliert diese und speichert sie für die Verwendung in der Simulation in je einer Datei pro

Messreihendatum und Datensatz ab. Alle zustandsabhängigen Größen wie zum Beispiel die spez. Enthalpie oder die Siedetemperatur werden in den MATLAB-Skripten mit Hilfe der frei erhältlichen Funktionsbibliothek *X STEAM* von *Magnus Holmgren* bestimmt (Holmgren, 2007).

3 Dimensionierung der Bauteile

3.1 Wandstärkenberechnung

3.1.1 Vergleichsspannung in zylindrischen Bauteilen

Allen in dieser Arbeit betrachteten Bauteilen ist gemeinsam, dass sie aus zylindrischen Grundkörpern bestehen, die durch einen inneren Druck, dem Prozessdruck, belastet werden. Schneidet man ein solches zylindrisches Bauteil frei und bildet das Gleichgewicht zwischen äußeren Kräften, die durch den Prozessdruck hervorgerufen werden, und den inneren Kräften, die das Material aufbringt, so sind drei Spannungen, nämlich die Tangentialspannung σ_{tan} , die Radialspannung σ_{rad} sowie die Längsspannung $\sigma_{\text{längs}}$ zu erkennen. Um dies näher zu erläutern ist in Bild 3-1 ein freigeschnittenes zylindrisches Bauteil mit den für die Spannungsberechnung wichtigen Größen dargestellt.

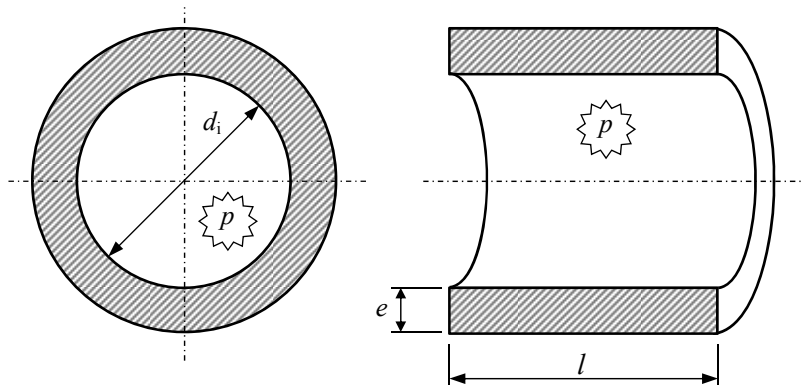


Bild 3-1: Wirksame Flächen bei der Spannungsberechnung in einem zylindrischen Bauteil

Der Innendruck p erzeugt infolge der jeweils wirksamen Flächen eine Kraft in Querrichtung, eine in Längsrichtung, sowie eine Kraft senkrecht zur Innenwand. Diese äußeren Kräfte entsprechen den inneren Kräften, die vom Material aufgenommen werden müssen. Die Kräftegleichgewichte lauten:

$$\sigma_{\text{tan}} \cdot 2 \cdot e \cdot l = p \cdot d_i \cdot l \quad 3.1-1$$

$$\sigma_{\text{längs}} \cdot \frac{(d_i + e)^2 - d_i^2}{4} \cdot \pi = p \cdot \frac{d_i^2}{4} \cdot \pi \quad 3.1-2$$

Die Materialspannungen entsprechen also dem Innendruck multipliziert mit dem Verhältnis von wirksamer Druckfläche zu Materialquerschnitt:

$$\sigma_{\text{tan}} = p \cdot \frac{d_i}{2 \cdot e} \quad 3.1-3$$

$$\sigma_{\text{längs}} = p \cdot \frac{d_i^2}{2 \cdot d_i \cdot e + e^2} \approx p \cdot \frac{d_i}{4 \cdot e} \quad 3.1-4$$

Wird die Ringfläche für die Längsspannung vereinfachend als Produkt aus Innendurchmesser, Wandstärke und π angenommen, so ist zu sehen, dass die Längsspannung $\sigma_{\text{längs}}$ etwa halb so hoch ist wie die Tangentialspannung σ_{tan} .

Die dritte Spannung entspricht der durch den Innendruck hervorgerufenen Flächenpressung, die im Gegensatz zur Tangential- und Längsspannung als Druckspannung auftritt und ein negatives Vorzeichen erhält. Die Flächenpressung wirkt an der inneren Oberfläche des Materials und nimmt nach außen hin ab. Die effektive Radialspannung ist damit:

$$\sigma_{\text{rad}} = -\frac{p}{2} \quad 3.1-5$$

Es handelt sich bei einem zylindrischen Bauteil unter Innendruck infolge der drei wirkenden Spannungsrichtungen um einen mehrachsigen Spannungszustand. Um diesen mehrachsigen Spannungszustand mit den gängigen Werkstoffkennwerten vergleichen zu können, muss eine Vergleichsspannung gebildet werden, denn die Werkstoffkennwerte werden anhand von einachsigen Belastungen ermittelt (vgl. Zugversuch). Da es sich in diesem Fall um eine eher statische Belastung von zähen Werkstoffen handelt, kommt die Schubspannungshypothese bei der Ermittlung der Vergleichsspannung zur Anwendung (Matek, et al., 2000). Sie ist die Differenz aus der größten und der kleinsten Hauptspannung. Aus den Gleichungen 3.1-3 bis 3.1-5 ist zu erkennen, dass dazu die Tangential- und die Radialspannung zählen. Die Vergleichsspannung σ_v ist daher:

$$\sigma_v = p \cdot \left(\frac{d_i}{2 \cdot e} + \frac{1}{2} \right) \quad 3.1-6$$

Aus Gleichung 3.1-6 ist die erforderliche Wandstärke zu berechnen, wenn man für die Vergleichsspannung die zulässige Spannung σ_{zul} einsetzt:

$$e \geq \frac{p \cdot d_i}{2 \cdot \sigma_{zul} - p} \quad 3.1-7$$

Die Schubspannungshypothese hat gegenüber der Gestaltänderungshypothese (vgl. von Mises) den Vorteil, dass sie zu etwas größeren Spannungen führt, was die Auslegung konservativ macht (Traupel, 2001). Grundsätzlich wird die Wandstärke bei Rohrleitungen und Behältern nach Gleichung 3.1-7 berechnet, wenn der Grundkörper (das zylindrische Bauteil) nicht durch Öffnungen oder Abzweige geschwächt wird. Die Auslegungsnorm für Kesselbauteile (DIN EN 12952-3, 2001) spricht dann von einer Verschwächung. Diese wird im folgenden Abschnitt erläutert.

3.1.2 Wandstärkenberechnung bei Verschwächung durch Ausschnitte

Der im vorherigen Abschnitt vorgestellte zylindrische Grundkörper stellt bei der Auslegung den einfachen Fall dar. In der Regel kommt es bei Rohrleitungen und Behältern zu einer Vielzahl von Ausschnitten und Abzweigen, um die Massenströme entsprechend zu führen. Solche Ausschnitte und Abzweige vergrößern in erster Linie die wirksame Druckfläche und verringern die tragenden Materialquerschnitte. In Bild 3-2 ist dies anschaulich dargestellt. Es ist der Längsschnitt eines zylindrischen Bauteils mit Abzweig dargestellt. Die wirksame Fläche, auf die der Innendruck p wirkt ist A_p . Die Flächen A_{fs} und A_{fb} bezeichnen die tragenden Materialquerschnitte. Dabei wird unterstellt, dass sich die Einflusszone des Druckes auf einen endlichen Bereich ausdehnt, der durch die sogenannten mittragenden Längen l_{fs} und l_{fb} bestimmt wird.

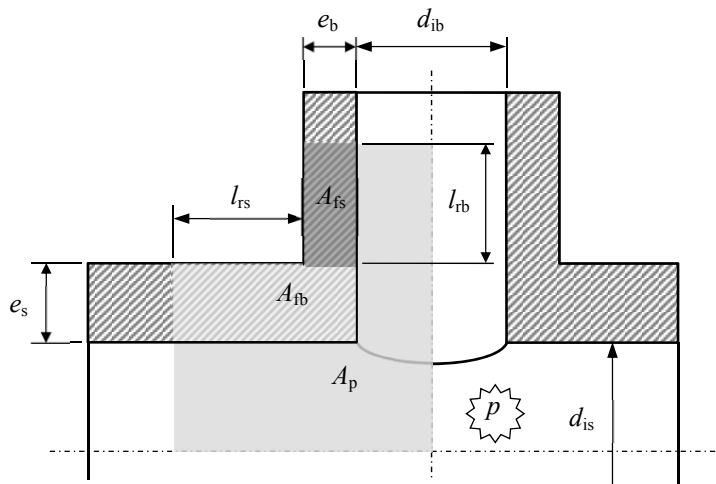


Bild 3-2: Wirksame Flächen bei der Spannungsberechnung in einem zylindrischen Bauteil mit Abzweig

Um die Verschwächung bei der Auslegung der Wandstärke zu berücksichtigen, wird ein Verschwächungsbeiwert v eingeführt. Mit dessen Hilfe wird die Auswirkung des Abzweigs bzw. Ausschnittes im Vergleich zu einem Grundkörper gleicher Wandstärke und gleichen Innendurchmessers jedoch ohne Ausschnitt bzw. Abzweig bestimmt. Dann gilt:

$$v = \frac{d_{is}}{2 \cdot e_s} \cdot \frac{A_{fs} + A_{fb}}{A_p} \quad 3.1-8$$

Mit diesem Verschwächungsbeiwert kann aus Gleichung 3.1-7 die erforderliche Wandstärke des Grundkörpers mit Ausschnitt bzw. Abzweig bestimmt werden:

$$e_s \geq \frac{p \cdot d_{is}}{(2 \cdot \sigma_{zul} - p) \cdot v} \quad 3.1-9$$

Dabei sind die für den Verschwächungsbeiwert erforderlichen Flächen gemäß Bild 3-2 folgendermaßen zu berechnen:

$$A_p = \frac{d_{is}}{2} \cdot \left(l_{rs} + e_b + \frac{d_{ib}}{2} \right) + \frac{d_{ib}}{2} \cdot (l_{rb} + e_s) \quad 3.1-10$$

$$A_{fs} = e_s \cdot (l_{rs} + e_b) \quad 3.1-11$$

$$A_{fb} = l_{fb} \cdot e_b \quad 3.1-12$$

Die mittragenden Längen entsprechen dabei gemäß DIN EN 12952-3 höchstens:

$$l_{rs} = \sqrt{e_s \cdot (d_{is} + e_s)} \quad 3.1-13$$

$$l_{rb} = \sqrt{e_b \cdot (d_{ib} + e_b)} \quad 3.1-14$$

Von kleineren mittragenden Längen ist nur dann auszugehen, wenn die Wandstärken sich innerhalb der so bestimmten Länge verringern. In dieser Arbeit wird von konstanten Wandstärken ausgegangen.

Mit den Gleichungen 3.1-8 bis 3.1-14 ist es möglich, die Wandstärke eines Bauteils anhand grundsätzlicher verfahrenstechnischer Überlegungen zu bestimmen. Dies liegt darin begründet, dass der Innendruck und der Innendurchmesser in der Regel bereits durch den Prozess vorgegeben sind, wenn auch mit einer gewissen Bandbreite.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Norm für die Auslegung von Wasserrohrkesseln (DIN EN 12952-3, 2001) eine Vielzahl weiterer Vorgaben macht, um ein Druckteil auszulegen. Angefangen von weiteren Belastungen (z.B. infolge von Durchbiegung durch die Wassermassen), über unterschiedliche Ausführungen der Abzweigungen (z.B. durchgesteckt oder aufgesetzt), bis hin zur Betrachtung der Böden, hat ein Hersteller bei der Dimensionierung wesentlich mehr zu berücksichtigen als es in diesem Abschnitt gezeigt wurde. Mit den hier vorgestellten Überlegungen, ist jedoch eine Bestimmung der bei einem solchen Bauteil typischerweise auftretenden größten Wandstärke möglich. Dabei bestimmen genau die Stellen mit den größten Wandstärken die Wärmespannungen. Aus diesem Grund ist eine Vereinfachung der Bauteildimensionierung, wie sie in diesem Abschnitt vorgestellt wurde, möglich.

3.2 Eingesetzte Materialien und ihre Eigenschaften

Die Frage der Materialwahl unterliegt vielen Überlegungen. Einerseits muss der Werkstoff den Belastungen bei einer bestimmten Temperatur und einer erwarteten Lebensdauer standhalten. Gleichzeitig müssen die Wandstärken jedoch möglichst gering sein, um einen flexiblen Betrieb (vgl. Temperaturspannungen) zu ermöglichen und um die Materialmassen zu verringern. In die Überlegungen muss auch die Verarbeitbarkeit ebenso wie die Beständigkeit der Materialien gegen chemische Einflüsse einbezogen werden. All diese Überlegungen können in dieser Arbeit nicht gemacht werden. Daher wird mit Hilfe einiger Referenzen aus dem konventionellen Kraftwerksbau die Frage nach der Materialwahl beantwortet. Für die hier betrachteten Bauteile und Belastungen kommen demnach drei Materialien in Betracht. Die physikalischen Eigenschaften, die dieser Arbeit zugrunde liegen, sind DIN EN 12952-3 entnommen und in Bild 3-3 abgedruckt. Das MATLAB-Skript zur Erzeugung der Regressionspolynome ist in Anhang G.2 (S. 217 ff.) zu finden.

15NiCuMoNb5-6-4

Bei diesem Werkstoff handelt es sich um ein niedriglegiertes ferritisches Material der Gruppe 4.2 (DIN EN 12952-2, 2011), das als Flacherzeugnis für den Druckbehälterbau bis zu einer Wandstärke von 200 mm zugelassen ist (DIN EN 10028-2, 2009). Die Einsatzgrenze dieses Werkstoffes liegt bei 450 °C. Hier werden noch hohe Werte der Warmdehngrenze $R_{p0,2,9}$ und Zeitstandfestigkeit $R_{mT,9}$ erreicht. Mit der hohen Temperaturleitfähigkeit eignet sich der Werkstoff damit für die Dampftrommel.

10CrMo9-10

Dieser ferritische Stahl ist für Berechnungstemperaturen bis 550 °C und Wandstärken bis 60 mm zugelassen. Im konventionellen Bereich findet man diesen Stahl bei Überhitzerrohren (strahlungsbeheizt), Sammlern und Frischdampfleitungen. Die Temperaturleitfähigkeit ist geringer als bei dem oben beschriebenen Werkstoff.

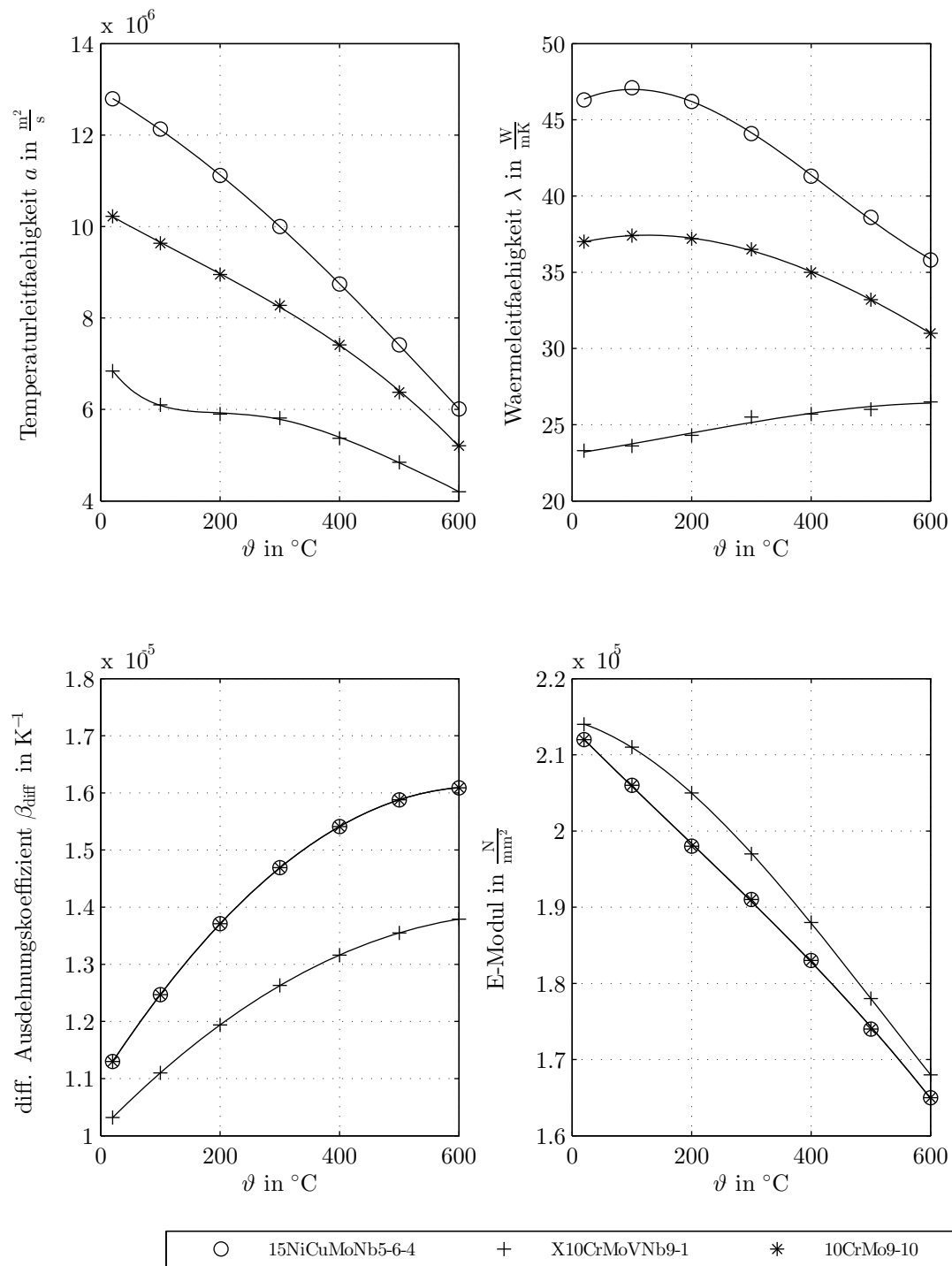


Bild 3-3: Temperaturabhängige Materialeigenschaften und deren Regression durch Polynome

X10CrMoVNb9-1 (T-91)

Hierbei handelt es sich um einen hochlegierten ferritischen Stahl (Gruppe 6.4), der bei Temperaturen bis 560°C und Wandstärken bis 120 mm eingesetzt wird (DIN EN 10216-2, 2007). Diesen Werkstoff findet man wie auch 10CrMo9-10 bei

Frischdampfleitungen, Sammlern und strahlungsbeheizten Kesselrohren. Die Temperaturleitfähigkeit bei 550 °C ist um etwa 14 % geringer als bei 10CrMo9-10, bei 200 °C sogar 34 % geringer. Der differentielle Wärmeausdehnungskoeffizient ist etwa 14 % geringer (als bei 10CrMo9-10), was die Auswirkungen der niedrigeren Temperaturleitfähigkeit insbesondere bei hohen Temperaturen teilweise kompensiert. Besonders bei niedrigeren Temperaturen sollte X10CrMoVNb9-1 ein ungünstigeres Verhalten zeigen und wird als konservative Annahme in dieser Arbeit sowohl für das strahlungsbeheizte Überhitzerrohr als auch für den Frischdampfsammler und die Frischdampfleitung zugrunde gelegt und nicht 10CrMo9-10.

In Bild 3-4 sind die Festigkeitskennwerte der drei Werkstoffe über der Temperatur aufgetragen. Für die Zeitstandfestigkeit sind die unteren Werte der Streubreite angegeben, wobei die Werte für X10CrMoVNb9-1 aus dem Werkstoffblatt des VdTÜV entnommen wurden (VdTÜV-Werkstoffblatt 511/2, 09.2011).

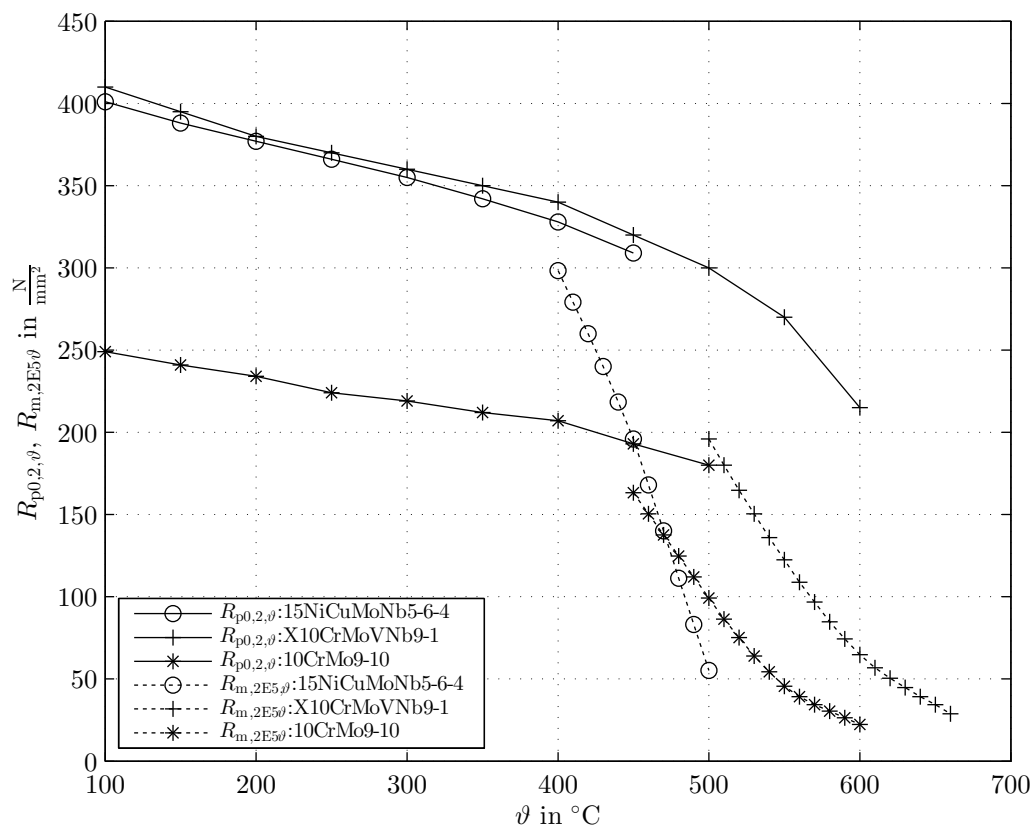


Bild 3-4: Festigkeitskennwerte der eingesetzten Werkstoffe

Die in den folgenden Kapiteln verwendeten zulässigen Spannungen werden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Sicherheitsfaktoren gebildet. Für die Warmdehngrenze $R_{p0,2,9}$ gilt ein Faktor von 1,5 und für die Zeitstandfestigkeit $R_{m2E5,9}$ ein Faktor von 1,25 (DIN EN 12952-3, 2001). Der kleinere Wert ist für die Auslegung der Wandstärke maßgeblich.

Ergänzend sei erwähnt, dass die Skalierungen auf Dampftemperaturen im Überhitzer von bis zu 600 °C führen (abgesehen von den noch höheren Anfahrsitzen). Mit dem notwendigen Zuschlag von 50 K läge die Berechnungstemperatur bei 650 °C, was austenitische Werkstoffe erfordern würde. Dies erscheint im Hinblick auf die geforderten Frischdampfparameter von 500 °C als unpraktikabel. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Diskrepanz zugelassen, um auch die Auswirkung der Temperatursitzen auf die Lastwechselschädigung zu erfassen. Würde auch die Kriecherschöpfung mit einbezogen, wäre der Ansatz unzulässig.

3.3 Spannungskonzentrationsfaktoren für die Ermüdungsberechnung

Bei der Auslegung kann die Wandstärke mit Hilfe des Verschwächungsbeiwertes v so weit verringert werden, dass die Vergleichsspannung gerade noch unter der zulässigen Spannung liegt. Dies reduziert die Wandstärken auf ein Minimum, verringert aber auch die zusätzliche Sicherheit. Eine leichte Überdimensionierung wird sich bereits dadurch einstellen, da die Materialstärken nicht in beliebigen Maßen erhältlich sind. Bei der späteren Berechnung der Betriebsspannungen, die gemäß DIN EN 12952-3 durchgeführt wird, spielt der Verschwächungsbeiwert v keine Rolle. Die Auslegungsnorm für Wasserrohrkessel liefert sowohl für den Druck, als auch für die Wand-Temperaturdifferenzen separate Spannungskonzentrationsfaktoren. Diese Faktoren dienen der Abschätzung der lokalen Spannungssitzen, die sich im Verschneidungsbereich von zwei Zylindern, bei wechselnder Druck und Temperaturbeanspruchung, einstellen. Grund für die Spannungskonzentration sind die unterschiedlichen Dehnungen von Grundkörper und Abzweig unter Innendruck sowie die zweiachsiges Dehnung bei Wandtemperaturunterschieden. In Abschnitt 5.1 wird darauf näher eingegangen, wenn es um die Bestimmung der Betriebsspannung geht.

Die in Abschnitt 3.4 durchgeführte Auswahl der Schnitte und die Dimensionierung der Wandstärke erfolgt unter Abschätzung der in einem solarthermischen Kraftwerk mit der geplanten Leistung realistisch vorkommenden Parametern. Eine Auslegung, die alle Faktoren berücksichtigt ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Dennoch soll bereits bei der Dimensionierung der Wandstärken betrachtet werden, unter welchen Umständen die Spannungskonzentrationsfaktoren ungünstige Werte annehmen, damit diese konservativ berücksichtigt werden können. Aus diesem Grund wird die Einführung der SKF dem Kapitel 5.1 vorweggenommen.

Der Spannungskonzentrationsfaktor (später auch SKF) für den Druck α_m ist aus der Norm zu entnehmen:

$$\alpha_m = 2,2 + e^{(-1,14 \cdot \varepsilon^2 - 0,89 \cdot \varepsilon + 1,43)} \cdot \left(\delta_m \cdot \sqrt{\frac{d_{ms}}{2 \cdot e_s}} \right)^{(0,326 \cdot \varepsilon^2 - 0,59 \cdot \varepsilon + 1,08)} \quad 3.3-1$$

Darin steht der Koeffizient δ_m für das Verhältnis der mittleren Durchmesser und ε ist das Wandstärkenverhältnis, e ist die *Eulersche* Zahl.

$$\delta_m = \frac{d_{mb}}{d_{ms}} = \frac{d_{ib} + e_b}{d_{is} + e_s} \quad 3.3-2$$

$$\varepsilon = \frac{e_b}{e_s} \quad 3.3-3$$

Es ist zu erwähnen, dass die Norm zwischen verschiedenen Wandstärken unterscheidet (z.B. vorhandene, mittlere, bestellte, erforderliche etc.). In dieser Arbeit wird nur eine verwendet. Es handelt sich dabei um die Wandstärke in der unmittelbaren Nähe des Abzweiges, die mit Gleichung 3.1-9 berechnet wird.

Der SKF für die Temperaturdifferenz α_t ist gegeben durch:

$$\alpha_t = \sqrt{\left(2 - \frac{37}{27} \cdot \delta_m - \frac{1 - e^{(-7 \cdot \delta_m)}}{27} \right)^2 + 0,81 \cdot \delta_m^2} \quad 3.3-4$$

Beide Spannungskonzentrationsfaktoren sind danach über die vier Parameter, Innendurchmesser des Grundkörpers und des Abzweigs und Wandstärke des Grundkörpers und des Abzweigs, gegeben. Aus den Gleichungen 3.3-1 und 3.3-4 ist nicht unmittelbar ersichtlich wo es zu kritischen Kombinationen dieser vier Parameter kommt. Da diese Arbeit eine gewisse Unschärfe bei der Wahl dieser Parameter nicht vermeiden kann, soll im Folgenden aufgezeigt werden, wie die vier Parameter mit den beiden Spannungskonzentrationsfaktoren in Bezug stehen.

Spannungskonzentrationsfaktor-Diagramme

Es sei angenommen, dass sowohl der Druck p , der mittlere Durchmesser des Grundkörpers d_{ms} als auch die werkstoff- und temperaturabhängige zulässige Spannung σ_{zul} bekannt sind. Die erste der drei Größen wurde in den Abschnitten 2.3 festgelegt bzw. ermittelt. Der Innendurchmesser steht anhand der Massenströme aus Abschnitt 2.5 fest. Die zulässige Spannung ist dem vorangegangenen Abschnitt zu entnehmen. Werden nun das Verhältnis der Innendurchmesser δ_i und das Wandstärkenverhältnis ε variiert, bleibt als Unbekannte die Wandstärke des Grundkörpers e_s . Um diese zu bestimmen, wird die Lösung der Auslegungsgleichung 3.1-9 gesucht. Es wird damit angenommen, dass die Wandstärke bis zur vollen Ausnutzung der zulässigen Spannung gesenkt wird. Da der in der Auslegungsgleichung vorhandene Verschwächungsbeiwert wiederum von der gesuchten Wandstärke abhängt, ist die Lösung für jede Kombination von δ_i und ε iterativ zu ermitteln. In Bild 3-5 und Bild 3-6 sind die Spannungskonzentrationsfaktoren in Abhängigkeit dieser Verhältnisse als dünne Konturlinien dargestellt.

Die dicken Konturlinien in den beiden Diagrammen verbinden die Orte mit konstantem Verhältnis aus Wandstärke e_s und Innendurchmesser d_{is} des Grundkörpers. Diese sind, wie schon die Konturlinien für die SKF, unter der Voraussetzung zu sehen, dass die Auslegungsgleichung 3.1-9 erfüllt ist. Dabei kann das Wandstärkenverhältnis ε nicht beliebig weit reduziert werden, denn für den Abzweig muss die Auslegungsgleichung 3.1-7 erfüllt sein. Daher werden die gekrümmten dicken Konturlinien im unteren Teil durch Geraden ersetzt. Der Verlauf der dicken Konturlinien ist also ausschließlich von den Auslegungsgleichungen 3.1-7 und 3.1-9 bestimmt und ist in bei-

den Diagrammen (Bild 3-5 und Bild 3-6) identisch. Die Diagramme werden im Folgenden an einem Beispiel erläutert.

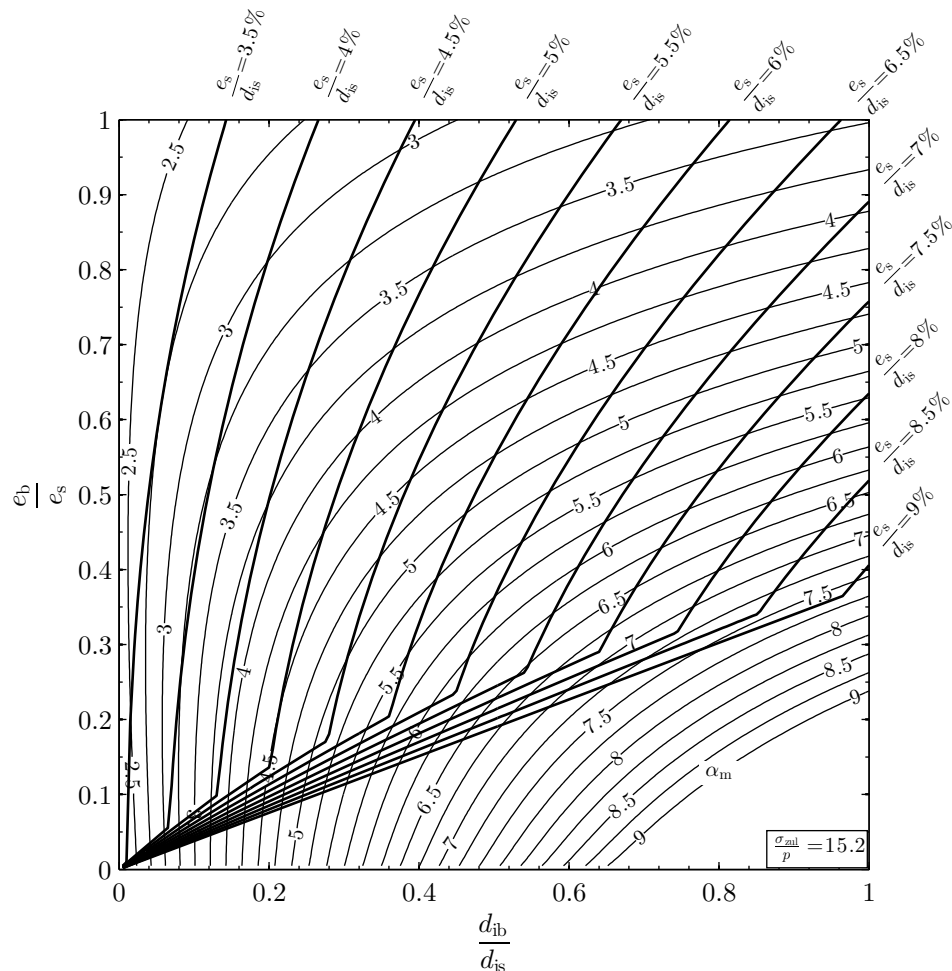


Bild 3-5: SKF für den Druck α_m in Abhängigkeit des Innendurchmesser- und Wandstärkenverhältnisses (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Man stelle sich vor, dass die Prozessdaten einen Abzweig an einem Bauteil erfordern, dessen Innendurchmesser der Hälfte des Grundkörpers entspricht. Dabei nehme man an, dass die Wandstärken gleich seien. Die dicken Konturlinien in den Diagrammen zeigen, dass die Wandstärke des Grundkörpers knapp 5 % des Innendurchmessers betragen muss. Ist man aber bestrebt, die Wandstärke des Abzweigs zu reduzieren, verkleinert man also das Wandstärkenverhältnis ε , so muss diese Reduktion des tragenden Querschnittes durch einen Zuwachs an Wandstärke des Grundkörpers kompensiert werden. Bei einem Wandstärkenverhältnis von 0,5 muss die Wandstärke des Grundkörpers etwa 6,2 % des Innendurchmessers betragen. Die Wandstärke des Abzweigs kann jedoch nur soweit gesenkt werden, bis die zulässige

Spannung in der Rohrwand des Abzweigs erreicht ist. In diesem Fall (Durchmesser-
verhältnis 0,5) beträgt das kleinste Wandstärkenverhältnis etwa 0,25 und die Wand-
stärke des Grundkörpers müsste auf etwa 7 % gesteigert werden.

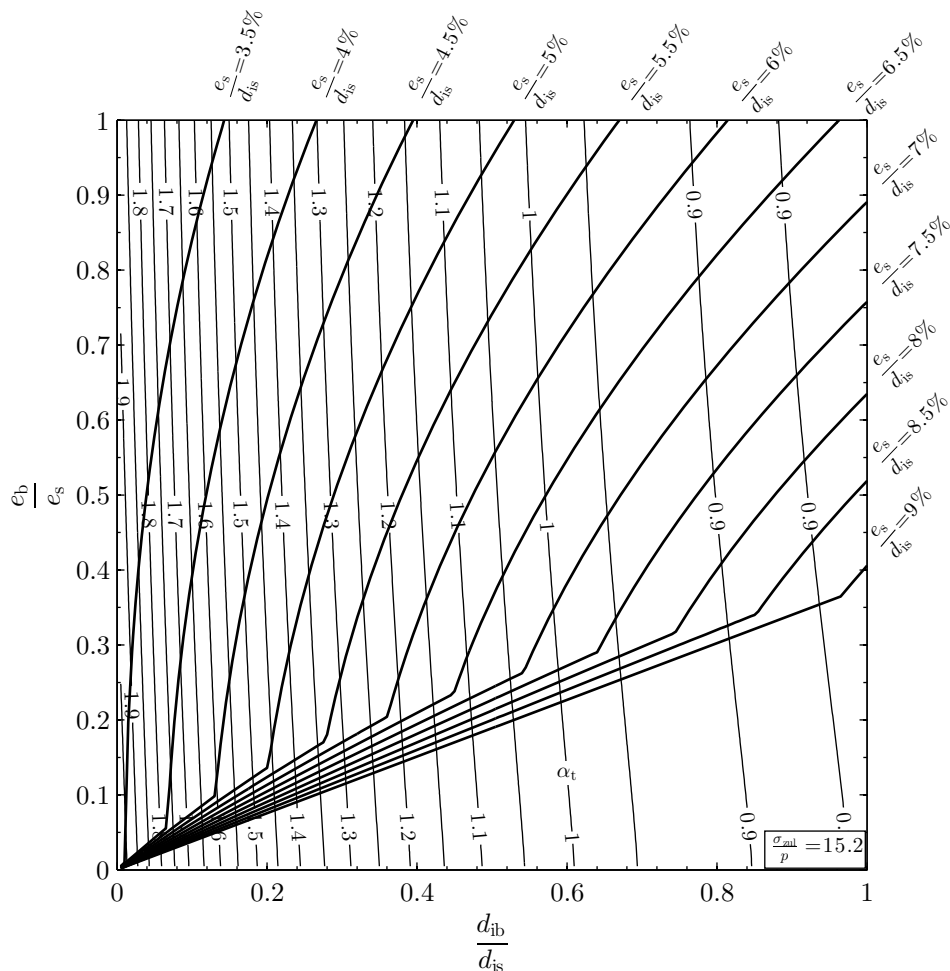


Bild 3-6: SKF für die Temperaturdifferenz α_t in Abhängigkeit des Innendurchmesser- und
Wandstärkenverhältnisses (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Eingangs wurde erwähnt, dass der Innendurchmesser des Grundkörpers bekannt sei.
Die Diagramme in Bild 3-5 und Bild 3-6 gelten jedoch für beliebige
Innendurchmesser d_{is} . Auf einen Nachweis soll hier verzichtet werden. Es ist jedoch
zu beachten, dass der Auslegungsdruck und die zulässige Spannung die Konturlinien
beeinflussen. Die Diagramme sind für das angegebene Verhältnis aus zulässiger
Spannung und Innendruck gültig. Bild 3-5 und Bild 3-6 entsprechen dem Verhältnis
für die Dampftrommel.

Der in der Praxis relevante Bereich ist in den SKF-Diagrammen in der oberen linken Hälfte zu suchen. Dahinter steckt die Überlegung, dass zwei Bauteile mit gleichen Innendurchmessern auch die gleiche Wandstärke besitzen. Würden sich die Wandstärken bei gleichen Innendurchmessern stark unterscheiden, käme es unter Innendruck zu unterschiedlichen Dehnungen, die im Verschneidungsbereich der beiden Zylinder zu hohen Spannungen führen würden. Das erklärt den raschen Anstieg von α_m am rechten Rand des Diagramms bei kleiner werdendem Wandstärkenverhältnis. Diese Spannungen nehmen mit kleinerem Durchmesser Verhältnis ab, da sich die absoluten Dehnungen beider Zylinder angleichen.

Der SKF für die Temperaturspannungen ist nahezu unabhängig vom Wandstärkenverhältnis (vgl. Bild 3-6) und nimmt in Richtung kleinerer Durchmesser Verhältnisse zu. Anschaulich wird dies dadurch, dass die Ränder einer kleinen Bohrung in einem großen Grundkörper bei Temperaturunterschieden in der Wand in alle Richtungen unter Zug- bzw. Druckspannungen stehen, wohingegen ein großer Ausschnitt tendenziell nur in einer Richtung belastet wird (siehe Bild 3-7).

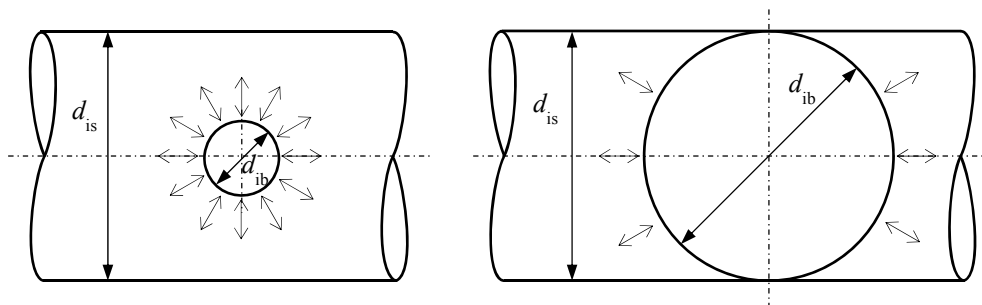


Bild 3-7: Prinzipielle Darstellung der Temperaturspannungen im Verschneidungsbereich zweier Zylinder bei kleinen und großen Durchmesser Verhältnissen

Mit den in diesem Abschnitt angestellten Überlegungen, werden im Folgenden die kritischen Schnitte ausgewählt. Im Anhang unter Abschnitt G.4 (S. 236 ff.) ist das MATLAB-Skript zu finden, mit dem die SKF-Diagramme erstellt werden.

3.4 Die Wahl der kritischen Schnitte

3.4.1 Dampftrommel

Die erste Frage, die es bei der Dampftrommel zu beantworten gilt, ist die Frage nach dem Durchmesser. Das Volumen der Dampftrommel ist einerseits durch das Volumen des Verdampfers bestimmt, andererseits durch das Absalzungsvermögen. Es existieren Richtwerte für die Dampfraumbelastung, die auf das Volumen des Dampfraumes schließen lassen. Bei dieser Betrachtung bleibt jedoch der Durchmesser unbekannt, da die Länge prinzipiell frei wählbar bleibt. Die Wandstärke nimmt linear mit dem Durchmesser zu (vgl. Gleichung 3.1-7). Bei gleichem Innenraumvolumen nimmt mit zunehmendem Innendurchmesser jedoch die Masse des Materials zu, da die Kreisringfläche quadratisch zunimmt, die Länge aber nur linear abnimmt. Aus dieser Überlegung müsste eine Dampftrommel einen sehr kleinen Durchmesser und eine große Länge aufweisen. Dieses Bild zeigt sich regelmäßig bei der Betrachtung von Dampftrommeln in der Praxis.

Zumeist sind es die Einbauten in der Dampftrommel, die deren Innendurchmesser bestimmen (Strauß, 2006). Diese Einbauten müssen für die Trennung der beiden Phasen sorgen, um zu verhindern, dass mit den Flüssigkeitstropfen Salze in den Überhitzer gelangen. Dort würden sie für schädigende Ablagerungen sorgen (Annaratone, 2008). Da dieser Faktor im Rahmen dieser Arbeit nicht ausreichend betrachtet werden kann, muss auch hier auf Referenzen zurückgegriffen werden. Daraus wird abgeleitet, dass eine Dampftrommel für die hier geltenden Parameter und Anlagengröße einen Durchmesser von 1,8 m besitzt.

Bei der Wahl der kritischen Schnitte wird im Hinblick auf die Überlegungen zu den Spannungsfaktoren sowohl der Austritt des Sattedampfes als auch ein kleinerer Anschluss (zum Beispiel für das Füllstandsrohr) berücksichtigt. Die Dampfaustritte werden die Abzweige mit den größten Durchmessern sein und damit die Wandstärke bestimmen. Der kleine Anschluss hingegen wird im Hinblick auf die Temperaturspannungen gewählt, die durch den SKF entsprechend hoch ausfallen. Die Wahl der Durchmesser der Abzweige geschieht auch hier mit Blick auf Referenzen aus dem konventionellen Bereich. Die dort eingesetzten Dampftrommeln befinden sich unmittelbar über dem Kessel und es müssen keine langen Zu- und Ableitungen einge-

setzt werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit die Abzweige direkt an die Trommel zu setzen. Anders ist es dagegen bei einem solarthermischen Kraftwerk. Hier sind die Leitungen von und zu den Kollektorfeldern entsprechend lang ausgeführt. Unter diesen Gesichtspunkten ist die Anzahl der Abzweige an der Dampftrommel geringer. Unabhängig davon werden für eine gleichmäßige Dampfantnahme aus der Trommel aber mehrere Abzweige benötigt und aus diesem Grund wird der Durchmesser des größten Abzweigs in Anlehnung an konventionelle Dampftrommeln mit 400 mm festgelegt. Das Wandstärkenverhältnis für diesen Abzweig wird auf 0,8 reduziert.

3.4.2 Überhitzer

Der Überhitzer ist prinzipiell ein beheiztes Rohr. Er enthält keine Abzweige und aus diesem Grund wird der Verschwächungsbeiwert zu 1. Daher wird lediglich ein Schnitt betrachtet, und zwar das Ende des Überhitzerrohres. Dieser Ort wird die höchsten Temperaturschwankungen des Überhitzers erfahren, da sich die Schwankungen aus der Bestrahlungsstärke über den Überhitzer summieren. Der Durchmesser des Überhitzerrohres ist dabei durch das eingesetzte Kollektormodul vorgegeben. Hier wird der Außendurchmesser auf 70 mm festgelegt, da dieser dem Wert der Referenzanlage entspricht und die Module auch für die skalierte Anlage zugrunde gelegt werden.

3.4.3 Überhitzersammler

Der Überhitzersammler verbindet alle Überhitzerstränge miteinander und mündet in der Frischdampfleitung. Um die Strömungsgeschwindigkeit gering zu halten, muss der ständige Zusatz an Dampfmassenstrom durch eine stufenweise Vergrößerung des Durchmessers kompensiert werden. Ähnlich wie schon bei der Dampftrommel werden zum einen das größte zu erwartende und zum anderen das kleinste zu erwartende Durchmesserverhältnis als Schnitt betrachtet. Zweifelsohne wird der Sammler auf Höhe des ersten Überhitzerstranges (vgl. Bild 2-3, S. 12) den kleinsten Durchmesser aufweisen. Hier wird davon ausgegangen, dass der Durchmesser an dieser Stelle gleich dem Durchmesser des Überhitzerrohres ist. Das Wandstärkenverhältnis ist gleich 1. Den größten Durchmesser besitzt der Sammler an der Stelle,

an der der in Strömungsrichtung letzte Überhitzerstrang einmündet. Der Durchmesser des Sammlers an dieser Stelle ist aufgrund von Überlegungen zum Druckverlust auf 0,4 m festgelegt worden.

3.4.4 Frischdampfleitung

Wie bereits oben erwähnt, ist die Frischdampfleitung die Fortsetzung des Frischdampfsammlers. Typischerweise gibt es in dieser Leitung vor dem Eintritt in die Turbine noch den Abzweig zur Hochdruck-Umleitstation, der wiederum einen leicht reduzierten Durchmesser aufweisen kann, jedoch zu dem größten Abzweig gehört, der die FD-Leitung verschwächt. Die Leitungen besitzen hier bereits einen gegenüber dem Frischdampfsammler reduzierten Durchmesser, da der Turbinenstutzen im Durchmesser limitierend sein wird. Analog zu oben wird auch hier ein zweiter Schnitt mit einem entsprechend kleinen Abzweig, z.B. einem Warmfahrstutzen zum Aufwärmen der Leitungen, gerechnet, um die Auswirkungen hoher SKF für die Temperaturdifferenz zu berücksichtigen.

3.4.5 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Überlegungen zu den Spannungskonzentrationsfaktoren ist zu den hier definierten kritischen Bauteilen jeweils ein Schnitt gewählt worden, bei dem es zu einem besonders hohen SKF für den Druck kommt und jeweils ein Schnitt, bei dem der SKF für die Temperatur besonders hoch ist. Der Begriff Schnitt stammt dabei aus dem Bereich der Festigkeitsnachweise, bei denen ein Bauteil im Bereich der Spannungsspitzen freigeschnitten wird, um anhand des Verlaufes den Spannungsnachweis zu führen.

Die generelle Festlegung des Innendurchmessers geschah mit Hilfe der skalierten Massenströme und im Hinblick auf Referenzen. Die durch den jeweiligen Abzweig entstehende Verschwächung im Grundkörper legt die Wandstärken fest, wobei die erforderlichen Sicherheiten nach Abschnitt 3.2 berücksichtigt worden sind. Die Veränderung der Wandstärken des Abzweigs hat bei kleinen Durchmesserhältnissen kaum Einfluss auf die Spannungskonzentration. Bei großen Durchmesserhältnissen hat die Wandstärke des Abzweigs einen großen

Einfluss auf den SKF für Druck. Daher wurde e_b im Hinblick auf Referenzen auf leicht reduzierte Werte festgelegt, um konservative Werte zu erhalten. In Tabelle 3-1 sind die Festlegungen aus den vier vorangegangenen Abschnitten wiedergegeben. Eine detaillierte Auflistung mit den wirksamen Flächen und zulässigen Spannungen ist in Tabelle D-1 im Anhang auf Seite 141 zu finden.

Schnitt	d_{is}	e_s	d_{ib}	e_b	α_m	α_t
1: Dampftrommel (Dampfaustritt)	1,8 m	75 mm	0,4 m	60 mm	3,08	1,38
2: Dampftrommel (kleiner Stutzen)	1,8 m	75 mm	0,65 mm	15 mm	2,73	1,85
3: Überhitzersammler (1. Strang)	57 mm	6,5 mm	0,57 mm	6,5 mm	3,25	1,0
4: Überhitzersammler (letzter Strang)	0,4 m	32 mm	0,57 mm	5,6 mm	3,52	1,57
5: Frischdampfleitung (HD-Umleitung)	0,3 m	30 mm	0,25 m	27 mm	3,49	1,0
6: Frischdampfleitung (kl. Stutzen)	0,3 m	25 mm	65 mm	5 mm	4,06	1,43
7: Receiverrohr	57 mm	6,5 mm	-	-	1,0	1,0

Tabelle 3-1: Übersicht über die Durchmesser und Wandstärken der einzelnen Schnitte und den daraus resultierenden Spannungskonzentrationsfaktoren

4 Modell zur Beschreibung der instationären Temperaturverteilung durch Wärmeleitung

4.1 Hintergrund

In der Regel dehnen sich Körper mit steigender Temperatur aus. Sind zwei Körper fest miteinander verbunden bzw. grenzen einander an und es kommt zu unterschiedlicher Erwärmung oder es handelt sich um unterschiedliche Stoffe, mit unterschiedlichen Ausdehnungseigenschaften, so spricht man von behinderter Dehnung. Bevor näher auf die daraus resultierenden Spannungen eingegangen wird, soll an dieser Stelle erläutert werden, wie sich die Temperatur in einem festen Körper ausbreitet, da die Kenntnis über die Temperaturverteilung für die Bestimmung der Spannungen wichtig ist. Die in dieser Arbeit betrachteten Bauteile sind in der Regel Zylinderschalen (z.B. Rohrleitungen) oder ähneln diesen stark. In Bild 4-1 ist im oberen Teil ein Sektor mit dem Winkel φ aus einem zylindrischen Bauteil der Länge l gezeigt. Darunter sieht man einen beliebigen Temperaturverlauf über den Radius.

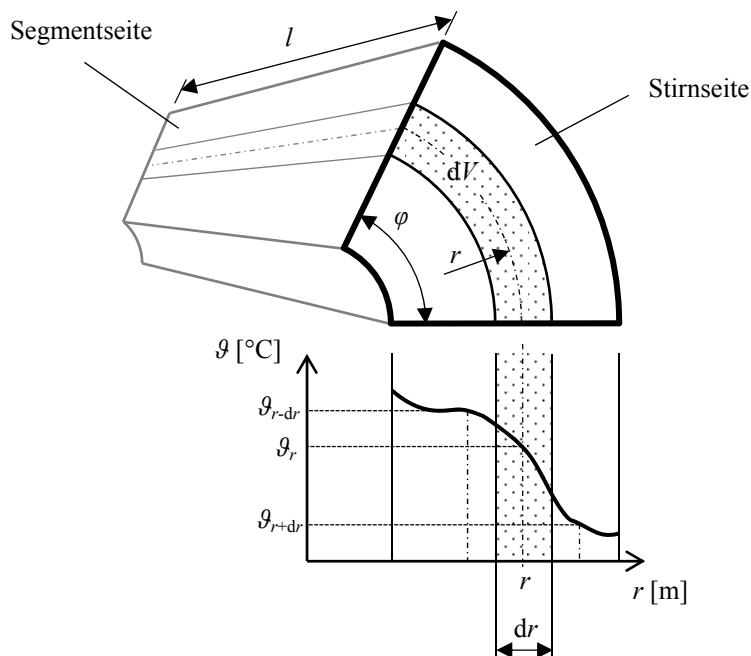


Bild 4-1: Beispielhafter instationärer Temperaturverlauf in radialer Richtung bei zylindrischen Körpern

Die in dem differentiellen Volumenelement dV gespeicherte thermische Energie Q kann unter der Voraussetzung einer konstanten Temperatur über dem Winkel φ und der Länge l und konstanter Dichte und Wärmekapazität über dem Volumen folgendermaßen ausgedrückt werden (Cerbe, et al., 2008):

$$dQ = \rho \cdot dV \cdot c \cdot \vartheta \quad 4.1-1$$

Die Vereinfachungen (konstante Temperatur über Umfang und Länge) können getroffen werden, da die in dieser Arbeit betrachteten Spannungen im Bauteil in erster Linie von der radialen Temperaturverteilung abhängen. Die Dichte und die Wärmekapazität sind kaum temperaturabhängig. Sie werden als konstant angenommen.

Die zeitliche Änderung der thermischen Energie, also die thermische Speicherleistung, im differentiellen Volumenelement lautet:

$$\frac{dQ}{dt} = \rho \cdot dV \cdot c \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad 4.1-2$$

Das differentielle Volumenelement wird durch den differentiellen Radius, den Segmentwinkel und die Länge beschrieben.

$$dV = l \cdot \frac{\varphi}{2} \cdot \left[\left(r + \frac{dr}{2} \right)^2 - \left(r - \frac{dr}{2} \right)^2 \right] = l \cdot \varphi \cdot r \cdot dr \quad 4.1-3$$

Und damit wird die thermische Speicherleistung aus 4.1-2 zu:

$$\frac{dQ}{dt} = \rho \cdot c \cdot l \cdot \varphi \cdot r \cdot dr \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad 4.1-4$$

Die oben beschriebene thermische Speicherleistung des differenziellen Volumenelementes muss gleich der Summe der über seine Grenzen ein und austretenden thermischen Leistungen, also Wärmeströme, sein, sofern keine Quellterme vorliegen.

Nimmt man vereinfachend an, dass das Zylindersegment sowohl an seinen Stirnseiten, als auch an seinen Segmentseiten keine Wärme austauscht, dann gilt:

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q}_+ + \dot{Q}_- \quad 4.1-5$$

Die zuvor getroffene Festlegung einer über den Umfang konstanten Temperatur bedeutet, dass die Segmentseitenflächen adiabat sind. Die adiabaten Stirnflächen werden angenommen, weil der Energieaustausch in der Praxis über diese Flächen eine untergeordnete Rolle spielt.

Um die vollständige Gleichung aufstellen zu können sind die beiden Wärmeströme an der inneren und äußeren Grenzfläche des differentiellen Volumenelementes zu beschreiben (Cerbe, et al., 2008):

$$\dot{Q}_- := -\lambda \cdot \varphi \cdot l \cdot \left(r - \frac{dr}{2}\right) \cdot \frac{d\vartheta_-}{dr} \quad 4.1-6$$

$$\dot{Q}_+ := \lambda \cdot \varphi \cdot l \cdot \left(r + \frac{dr}{2}\right) \cdot \frac{d\vartheta_+}{dr} \quad 4.1-7$$

Darin steht die Indizierung für den inneren (-) und den äußeren Temperaturgradienten (+). Ab hier wird die Temperatur partiell abgeleitet und der Differenzialoperator ändert sich entsprechend. Aus der Gleichung 4.1-5 wird mit Hilfe von 4.1-4, 4.1-6 und 4.1-7:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \left[\frac{\frac{\partial \vartheta_+}{\partial r} - \frac{\partial \vartheta_-}{\partial r}}{\partial r} + \frac{1}{2 \cdot r} \left(\frac{\partial \vartheta_+}{\partial r} + \frac{\partial \vartheta_-}{\partial r} \right) \right] \quad 4.1-8$$

Der linke Summand in der Klammer stellt das Differential der Temperaturgradienten dar und damit die zweite Ableitung der Temperatur über dem Radius. Weiter kann man die beiden differentiellen Randtemperaturen umschreiben (vgl. Bild 4-1):

$$\partial \vartheta_+ = \vartheta_{r+dr} - \vartheta_r \quad 4.1-9$$

$$\partial \vartheta_- = \vartheta_r - \vartheta_{r-dr} \quad 4.1-10$$

So wird die Summe der differentiellen Temperaturen über den Rändern zur doppelten differentiellen Temperatur über dr :

$$\partial \vartheta_+ + \partial \vartheta_- = \vartheta_{r+dr} - \vartheta_{r-dr} = 2 \cdot \partial \vartheta \quad 4.1-11$$

Damit lässt sich die instationäre eindimensionale Temperaturverteilung durch Wärmeleitung beschreiben als:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{\partial \vartheta}{r \cdot \partial r} \right) \quad 4.1-12$$

Die Bedeutung des rechten Summanden nimmt mit zunehmendem Radius ab. Die Differenzialgleichung geht bei unendlich großem Radius in die Form für die ebene Platte über, die als Fourier-Gleichung bekannt ist (Grigull, et al., 1990). Darin spielt nur noch die zweite Ableitung, also die Krümmung des Temperaturverlaufes über dem Radius bei der Temperaturleitung eine Rolle. Nimmt die Steigung der Temperatur (über dem Radius) am Radius r zu, so „fließt“ mehr Wärme in das differentielle Volumenelement als aus ihm „herausfließt“. Ein Maß für die Geschwindigkeit mit der diese Vorgänge ablaufen ist die sogenannte Temperaturleitfähigkeit, die vom Werkstoff und von der Temperatur abhängig ist. Sie wird im Laufe dieser Arbeit mit dem kleinen lateinischen Buchstaben a beschrieben und entspricht (Grigull, et al., 1990):

$$a := \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad 4.1-13$$

Ferritischen Materialien weisen prinzipiell eine höhere Temperaturleitfähigkeit auf als austenitische Werkstoffe. Damit gleichen sich Temperaturunterschiede in erstgenannten Werkstoffen schneller aus. Generell verhalten sich die betrachteten Werkstoffe mit steigender Temperatur in Bezug auf das Ausgleichen von Temperaturunterschieden träger (VGB-R 105 M, 1990). Dies ist auch für die in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe zu beobachten (vgl. Bild 3-3, S. 36).

4.2 Diskretisierung der Fourier-Gleichung zur Wärmeleitung

4.2.1 Finite Differenzen Methode

Die analytische Lösung der partiellen Differenzialgleichung (später auch DGL) 4.1-12 ist nur mit Einschränkungen möglich. Grigull, et al. (1990) und Strauß (2006) liefern Näherungslösungen für die Sprungantwort und für linear ansteigende Temperaturen mit Hilfe von Fourierreihen. In dieser Arbeit soll jedoch ein beliebiger Temperaturverlauf untersucht werden. Daher wird die partielle DGL mit Hilfe der Finiten-Differenzen-Methode diskretisiert. Für die Ableitungen werden die ersten Glieder der sogenannten Taylorreihe verwendet. Mit Hilfe der Taylorreihe (vgl. 4.2-1) können aus der Kenntnis des Funktionswertes und der Ableitungen der Funktion in einem Punkt angrenzende Funktionswerte bestimmt bzw. angenähert werden (Bronstein, et al., 2001).

$$\begin{aligned} \vartheta(r + \Delta r) = & \vartheta(r) + \frac{\Delta r}{1!} \vartheta'(r) + \frac{\Delta r^2}{2!} \vartheta''(r) + \frac{\Delta r^3}{3!} \vartheta'''(r) + \dots \\ & + \frac{\Delta r^n}{n!} \vartheta^n(r + \theta \cdot \Delta r) \end{aligned} \quad 4.2-1$$

mit $0 < \theta < 1$

Bricht man diese Reihe nach dem zweiten Glied ab und stellt die Gleichung nach der gesuchten Ableitung um, so erhält man einen Differenzenquotienten.

$$\vartheta'(r) = \frac{\vartheta(r + \Delta r) - \vartheta(r)}{\Delta r} + O(\Delta r) \quad 4.2-2$$

In Gleichung 4.2-2 ist der sogenannte rechtsseitige Differenzenquotient gezeigt. Es existieren ebenso ein linksseitiger Differenzenquotient und die Kombination aus beiden. Dieser wird als zentraler Differenzenquotient bezeichnet. Der bei dem Abbruch der Taylorreihe bleibende Rest wird hier durch das Landau-Symbol O dargestellt (Bronstein, et al., 2001). Bei der Verwendung des Differenzenquotienten wird dieser Rest weggelassen und stellt einen Fehler dar. Sowohl beim rechts- als auch beim linksseitigen Differenzenquotient ist der Fehler proportional zur Schrittweite.

Der zentrale Differenzenquotient bietet eine höhere Fehlerordnung und somit einen kleineren Fehler bei gleicher Schrittweite:

$$\vartheta'(r) = \frac{\vartheta(r + \Delta r) - \vartheta(r - \Delta r)}{2 \cdot \Delta r} + O(\Delta r^2) \quad (\text{Bronstein, et al., 2001}) \quad 4.2-3$$

In dem in dieser Arbeit realisierten Verfahren kommt sowohl für die Zeit- als auch für die Ortsdiskretisierung der zentrale Differenzenquotient (später auch DQ) zum Einsatz. Wird die Taylorreihe nach dem dritten Glied abgebrochen und für die erste Ableitung der bereits bekannte DQ aus Gleichung 4.2-3 eingesetzt, so erhält man den DQ für die zweite Ableitung.

$$\vartheta''(r) = \frac{\vartheta(r + \Delta r) - 2 \cdot \vartheta(r) + \vartheta(r - \Delta r)}{\Delta r^2} + O(\Delta r^2) \quad 4.2-4$$

Mit den DQ aus den Gleichungen 4.2-3 und 4.2-4 kann man die partielle DGL 4.1-12 umschreiben zu:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \approx a \cdot \left[\frac{\vartheta(r + \Delta r) - 2 \cdot \vartheta(r) + \vartheta(r - \Delta r)}{\Delta r^2} + \frac{\vartheta(r + \Delta r) - \vartheta(r - \Delta r)}{r \cdot 2 \cdot \Delta r} \right] \quad 4.2-5$$

An dieser Stelle wird eine Kurzschreibweise eingeführt, indem der Ort und die Zeit als Indizierung aufgenommen werden. Dabei gilt die Indizierung Plus (+) für den Funktionswert zum jeweils nächsten Zeitpunkt bzw. am nächsten Ort in positiver Richtung und Minus (-) am nächsten Ort in negativer Zählrichtung. Mit dem rechtsseitigen DQ für die Zeit wird aus Gleichung 4.2-5:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \approx \frac{\vartheta_{t+,r} - \vartheta_{t,r}}{\Delta t} = a \cdot \left[\frac{\vartheta_{t,r+} - 2 \cdot \vartheta_{t,r} + \vartheta_{t,r-}}{\Delta r^2} + \frac{\vartheta_{t,r+} - \vartheta_{t,r-}}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right] \quad 4.2-6$$

Diese Zeitdiskretisierung bezeichnet man als explizites Verfahren (Coleman, 2005). Dabei ist der Funktionswert zum nächsten Zeitschritt ($t+\Delta t$) explizit durch die Werte zum Zeitpunkt t bestimmbar. Es ist daher kein Gleichungssystem zu lösen.

Anders das implizite Verfahren, bei dem jeder Funktionswert am nächsten Zeitschritt implizit durch drei Werte zum Zeitpunkt t beschrieben wird:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \approx \frac{\vartheta_{t+,r} - \vartheta_{t,r}}{\Delta t} = a \cdot \left[\frac{\vartheta_{t+,r+} - 2 \cdot \vartheta_{t+,r} + \vartheta_{t+,r-}}{\Delta r^2} + \frac{\vartheta_{t+,r+} - \vartheta_{t+,r-}}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right] \quad 4.2-7$$

Die Lösung ist nur möglich, wenn das Gleichungssystem gelöst wird. Das explizite Verfahren kann Stabilitätsprobleme aufweisen und gibt die physikalischen Gesetze durch die Entkopplung weniger gut wieder als das implizite Verfahren. Daher ist das letztere Verfahren zu präferieren. Beide Verfahren besitzen die Fehlerordnung $O(\Delta t, \Delta r^2)$. Eine bessere Fehlerordnung, nämlich $O(\Delta t^2, \Delta r^2)$, bietet das sogenannte Crank-Nicolson-Verfahren (Coleman, 2005).

4.2.2 Crank-Nicolson Verfahren

Das Verfahren von Crank-Nicolson berechnet den Funktionswert zum Zeitpunkt $t + \Delta t/2$ mit Hilfe des zentralen DQ (TU Berlin, Institut für Mathematik, 2011).

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \right|^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \frac{\vartheta_{t+,r} - \vartheta_{t,r}}{2 \cdot \frac{\Delta t}{2}} + O(\Delta t^2) \quad 4.2-8$$

Die rechte Seite aus Gleichung 4.1-12 wird als arithmetisches Mittel der Temperaturen zu den Zeitpunkten t und $t + \Delta t$ gebildet, wobei jeweils der zentrale DQ gebildet wird.

$$\begin{aligned} \frac{\vartheta_{t+,r} - \vartheta_{t,r}}{\Delta t} = & \zeta \cdot a \cdot \left(\frac{\vartheta_{t+,r+} - 2 \cdot \vartheta_{t+,r} + \vartheta_{t+,r-}}{\Delta r^2} + \frac{\vartheta_{t+,r+} - \vartheta_{t+,r-}}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right) \\ & + (1 - \zeta) \cdot a \cdot \left(\frac{\vartheta_{t,r+} - 2 \cdot \vartheta_{t,r} + \vartheta_{t,r-}}{\Delta r^2} + \frac{\vartheta_{t,r+} - \vartheta_{t,r-}}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right) \text{ mit } \zeta = 0,5 \end{aligned} \quad 4.2-9$$

In Gleichung 4.2-9 ist ζ der Modifikator für das Verfahren. Damit kann das Crank-Nicolson-Verfahren in das implizite und explizite überführt werden. Für $\zeta \geq 0,5$ sei das Verfahren stabil (Coleman, 2005).

Die einzelnen Temperaturen in Gleichung 4.2-9 werden ausgeklammert und sortiert:

$$\begin{aligned}
& \frac{(1 - \xi) \cdot a}{2 \cdot \Delta r^2} \cdot \left(2 - \frac{\Delta r}{r}\right) \cdot \vartheta_{t,r_-} + \left(\frac{\Delta r^2 - 2 \cdot (1 - \xi) \cdot a \cdot \Delta t}{\Delta t \cdot \Delta r^2}\right) \cdot \vartheta_{t,r} \\
& + \frac{(1 - \xi) \cdot a}{2 \cdot \Delta r^2} \cdot \left(2 + \frac{\Delta r}{r}\right) \cdot \vartheta_{t,r_+} + \frac{\xi \cdot a}{2 \cdot \Delta r^2} \cdot \left(2 - \frac{\Delta r}{r}\right) \cdot \vartheta_{t_+,r_-} \\
& + \left(\frac{-\Delta r^2 - 2 \cdot \xi \cdot a \cdot \Delta t}{\Delta t \cdot \Delta r^2}\right) \cdot \vartheta_{t_+,r} + \frac{\xi \cdot a}{2 \cdot \Delta r^2} \cdot \left(2 + \frac{\Delta r}{r}\right) \cdot \vartheta_{t_+,r_+} \\
& = 0
\end{aligned} \tag{4.2-10}$$

Es wird folgendes festgelegt:

$$B_1 := \frac{(1 - \xi) \cdot \bar{a}_t}{2 \cdot \Delta r^2} \tag{4.2-11}$$

$$B_2 := \frac{\Delta r^2 - 2 \cdot (1 - \xi) \cdot \Delta t \cdot \bar{a}_t}{\Delta t \cdot \Delta r^2} \tag{4.2-12}$$

$$B_3 := \frac{\xi \cdot \bar{a}_t}{2 \cdot \Delta r^2} \tag{4.2-13}$$

$$B_4 := \frac{-\Delta r^2 - 2 \cdot \xi \cdot \Delta t \cdot \bar{a}_t}{\Delta t \cdot \Delta r^2} \tag{4.2-14}$$

$$\Gamma_{+,r} := \left(2 + \frac{\Delta r}{r}\right) \tag{4.2-15}$$

$$\Gamma_{-,r} := \left(2 - \frac{\Delta r}{r}\right) \tag{4.2-16}$$

Strenggenommen hängt die Temperaturleitfähigkeit a von der Temperatur und damit im instationären Fall vom Zeitpunkt t ab. Bei der Definition des Temperaturleitkoeffizienten B (groß Beta) wird an dieser Stelle vereinfachend angenommen, dass die Änderung der temperaturabhängigen Stoffdaten über dem Radius und von einem zum nächsten Zeitschritt vernachlässigbar klein sind. Grundlage für die Berechnung der temperaturabhängigen Stoffwerte ist also die über dem Radius gemittelte Temperatur zum Zeitpunkt t . Mit den Gleichungen 4.2-11 bis 4.2-16 wird aus Gleichung 4.1-9:

$$\begin{aligned}
& B_3 \cdot \Gamma_{-,r} \cdot \vartheta_{t_+,r_-} + B_4 \cdot \vartheta_{t_+,r} + B_3 \cdot \Gamma_{+,r} \cdot \vartheta_{t_+,r_+} \\
& = -B_1 \cdot \Gamma_{-,r} \cdot \vartheta_{t,r_-} - B_2 \cdot \vartheta_{t,r} - B_1 \cdot \Gamma_{+,r} \cdot \vartheta_{t,r_+}
\end{aligned} \tag{4.2-17}$$

Darin wurden bereits die bekannten Temperaturen zum Zeitpunkt t (Anfangswerte) auf die rechte Seite geschrieben.

4.3 Ansetzen der Randbedingungen

4.3.1 Aufstellen des linearen Gleichungssystems

Bei der Betrachtung von Gleichung 4.2-17 wird deutlich, dass für n diskrete Orte n Gleichungen entstehen, jedoch $n+2$ Unbekannte existieren, nämlich die Temperaturen an den Orten r_0 und r_{n+1} . Diese beiden Unbekannten sind die Randwerte des Problems, die zu jedem Zeitpunkt t vorgegeben werden müssen. Allgemein wird aus Gleichung 4.2-17 ein lineares Gleichungssystem, das auf der rechten Seite noch Unbekannte besitzt (vgl. Gleichung 4.3-1). Dabei werden die Terme, die von den Randbedingungen bestimmt werden mit R_0 und R_{n+1} bezeichnet. Sie enthalten sowohl einen unbekannten als auch einen bekannten Teil. Um das Gleichungssystem lösen zu können, müssen sie getrennt werden.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} B_4 & B_3 \cdot \Gamma_{+,1} & 0 & 0 \\ B_3 \cdot \Gamma_{-,2} & B_4 & B_3 \cdot \Gamma_{+,2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & B_3 \cdot \Gamma_{-,n} & B_4 \end{bmatrix}}_{:= K} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \vartheta_{t+,1} \\ \vartheta_{t+,2} \\ \vdots \\ \vartheta_{t+,n} \end{bmatrix}}_{:= U} = \underbrace{\begin{bmatrix} -B_2 \cdot \vartheta_{t,1} - B_1 \cdot \Gamma_{+,1} \cdot \vartheta_{t,2} + R_0 \\ -B_1 \cdot \Gamma_{-,2} \cdot \vartheta_{t,1} - B_2 \cdot \vartheta_{t,2} - B_1 \cdot \Gamma_{+,2} \cdot \vartheta_{t,3} \\ \vdots \\ -B_1 \cdot \Gamma_{-,n} \cdot \vartheta_{t,n-1} - B_2 \cdot \vartheta_{t,n} + R_{n+1} \end{bmatrix}}_{:= F} \quad 4.3-1$$

K ist die Koeffizientenmatrix, U der unbekannte Lösungsvektor und F der bekannte Lastvektor. Die Koeffizientenmatrix ist aufgrund der temperaturabhängigen Temperaturleitfähigkeit und der sich ändernden Randbedingungen für jeden Zeitschritt neu zu berechnen. Die Terme, die die Randbedingungen enthalten die Temperaturen der Randschicht zu den Zeitpunkten t und $t+\Delta t$.

$$R_0 = -B_3 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot \vartheta_{t+,0} - B_1 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot \vartheta_{t,0} \quad 4.3-2$$

$$R_{n+1} = -B_3 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot \vartheta_{t+,n+1} - B_1 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot \vartheta_{t,n+1} \quad 4.3-3$$

In dieser Arbeit stellen die Randwerte die Fluidtemperaturen beziehungsweise die Wärmestromdichten an den Grenzen des Bauteils dar, zum Beispiel die Temperatur des überhitzten Frischdampfes. Dieser strömt durch das Bauteil (Rohrleitung), das wiederum außen gegenüber der Umgebungsluft isoliert ist. Ein weiteres Beispiel stellt das Überhitzerrohr dar, das von außen durch die konzentrierte Solarstrahlung

beheizt wird und durch das innen wiederum Dampf strömt. In keinem hier behandelten Fall sind die eigentlichen Randtemperaturen des Bauteils bekannt, sondern entweder die Wärmestromdichte (Randbedingung 2. Art) oder die Fluidtemperatur zusammen mit dem Wärmeübergangskoeffizienten (Randbedingung 1. Art).

4.3.2 Konvektion an der Innenseite des Bauteils

Bei der Konvektion, also dem Wärmeübergang zwischen Festkörper und Fluid, ist die Wärmestromdichte von der Temperaturdifferenz zwischen Wand und ungestörter Strömung und vom Wärmeübergangskoeffizient abhängig. Die unbekannte Größe ist hierbei die Wandtemperatur, wohingegen die Fluidtemperatur und der Wärmeübergangskoeffizient anhand der skalierten Messdaten bestimmt werden bzw. bestimmt sind (vgl. Abschnitt 2.4 und 4.4). Diese Randbedingung wird in der Literatur als *Cauchy* Randbedingung bezeichnet (Grigull, et al., 1990). In Bild 4-2 ist der Temperaturverlauf der ungestörten Strömung und des Bauteils dargestellt.

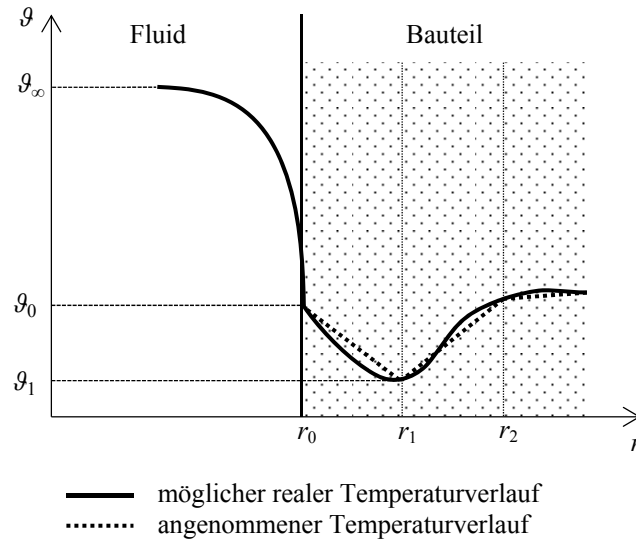


Bild 4-2: Temperaturverlauf beim Wärmeübergang vom Fluid auf einen Festkörper zur Verdeutlichung der Konvektions-Randbedingung

Um auf die unbekannte Randtemperatur zu kommen wird angenommen, dass der Wärmestrom zwischen den Orten r_0 und r_1 , also durch die erste Bauteilschicht, gleich dem konvektiven Wärmestrom ist, der von der Randschicht des Fluids über-

tragen wird (TU Berlin, Institut für Mathematik, 2011). Der Wärmestrom sei daher rechts und links von r_0 gleich:

$$\dot{Q} = \alpha_{\text{innen}} \cdot (\vartheta_{\infty} - \vartheta_0) \cdot 2 \cdot r_0 \cdot \pi \cdot l = \frac{\lambda}{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_1) \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \quad 4.3-4$$

Diese Annahme vernachlässigt jeglichen Strahlungsaustausch, den die Bauteilwand mit ihrer Umgebung haben könnte, und setzt voraus, dass die Schrittweite klein genug gewählt wird, um Fehler durch einen gekrümmten Bauteiltemperaturverlauf vernachlässigen zu können.

Stellt man nach der gesuchten Randtemperatur um und berücksichtigt die zeitlich veränderlichen Werte, wird aus Gleichung 4.3-4:

$$\vartheta_{t,0} = A_{1,t} \cdot \vartheta_{t,1} + A_{2,t} \cdot \vartheta_{t,\infty} \quad 4.3-5$$

Darin wird A , hier als Wärmeüberleitkoeffizient benannt, folgendermaßen definiert:

$$A_{1,t} := \frac{\bar{\lambda}_t}{\alpha_{t,\text{innen}} \cdot r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \bar{\lambda}_t} \quad 4.3-6$$

$$A_{2,t} := \frac{\alpha_{t,\text{innen}} \cdot r_0}{\alpha_{t,\text{innen}} \cdot r_0 + \frac{\bar{\lambda}_t}{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}} \quad 4.3-7$$

Analog zur weiter oben beschriebenen Vorgehensweise wird die Änderung der Wärmeleitfähigkeit λ von einem zum nächsten Zeitschritt vernachlässigt und jeweils für die bekannte über den Radius gemittelte Temperatur zum Zeitpunkt t bestimmt. Dahingegen wird der bekannte Wärmeübergangskoeffizient α für jeden Zeitschritt berücksichtigt. Die Randtemperatur aus Gleichung 4.3-5 wird in den Randbedingungsterm R_0 aus Gleichung 4.3-2 eingesetzt.

$$R_0 = -B_3 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot A_{2,t_+} \cdot \vartheta_{t_+,\infty} - B_1 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot (A_{1,t} \cdot \vartheta_{t,1} + A_{2,t} \cdot \vartheta_{t,\infty}) - B_3 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot A_{1,t_+} \cdot \vartheta_{t_+,1} \quad 4.3-8$$

Hier wird der unbekannte Teil der Randbedingungen deutlich, der von der Temperatur $\vartheta_{t+,1}$ abhängt ist und entsprechend auf die linke Seite der Gleichung 4.3-1 übergehen muss. Die ersten Elemente von K und F werden zu:

$$K_{(1,1)} = B_4 + B_3 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot A_{1,t+} \quad 4.3-9$$

$$F_{(1)} = - (B_2 + B_1 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot A_{1,t}) \cdot \vartheta_{t,1} - (B_1 \cdot \Gamma_{+,1}) \cdot \vartheta_{t,2} \\ - (B_1 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot A_{2,t}) \cdot \vartheta_{t,\infty} - (B_3 \cdot \Gamma_{-,1} \cdot A_{2,t+}) \cdot \vartheta_{t+, \infty} \quad 4.3-10$$

Die innere Randbedingung ist nun durch die Vorgabe der Fluidtemperatur und des Wärmeübergangskoeffizienten über der Zeit definiert.

4.3.3 Konvektion an der Außenseite des Bauteils

Analog zu den vorangestellten Erläuterungen wird bei der Konvektion am äußeren Bauteilrand (r_{n+1}) vorgegangen. Der Wärmestrom ist dort:

$$\dot{Q} = \alpha_{\text{aussen}} \cdot (\vartheta_{\infty} - \vartheta_{n+1}) \cdot 2 \cdot r_{n+1} \cdot \pi \cdot l = \frac{\lambda}{\ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right)} \cdot (\vartheta_{n+1} - \vartheta_n) \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \quad 4.3-11$$

Durch Umformen ergibt sich die gesuchte Temperatur wie folgt:

$$\vartheta_{t,n+1} = A_{3,t} \cdot \vartheta_{t,n} + A_{4,t} \cdot \vartheta_{t,\infty} \quad 4.3-12$$

Es gilt folgendes:

$$A_{3,t} := \frac{\bar{\lambda}_t}{\alpha_{t,\text{aussen}} \cdot r_{n+1} \cdot \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right) + \bar{\lambda}_t} \quad 4.3-13$$

$$A_{4,t} := \frac{\alpha_{t,\text{aussen}} \cdot r_{n+1}}{\alpha_{t,\text{aussen}} \cdot r_{n+1} + \frac{\bar{\lambda}_t}{\ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right)}} \quad 4.3-14$$

Damit stehen der Randbedingungsterm R_{n+1} und die letzten Elemente von K und F fest (vgl. Gleichung 4.3-3).

$$R_{(n+1)} = -B_3 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot A_{4,t+} \cdot \vartheta_{t+, \infty} - B_1 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot (A_{3,t} \cdot \vartheta_{t,n} + A_{4,t} \cdot \vartheta_{t, \infty}) - B_3 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot A_{3,t+} \cdot \vartheta_{t+,n} \quad 4.3-15$$

$$K_{(n,n)} = B_4 + B_3 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot A_{3,t+} \quad 4.3-16$$

$$F_{(n)} = -(B_1 \cdot \Gamma_{-,n}) \cdot \vartheta_{t,n-1} - (B_2 + B_1 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot A_{3,t}) \cdot \vartheta_{t,n} - (B_1 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot A_{4,t}) \cdot \vartheta_{t, \infty} - (B_3 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot A_{4,t+}) \cdot \vartheta_{t+, \infty} \quad 4.3-17$$

4.3.4 Strahlung an der Außenseite des Bauteils

Bei einem solarthermischen Kraftwerk wird die Sonnenenergie konzentriert und auf die vom Dampf oder von einem anderen Medium durchströmte Rohrleitung übertragen. In diesem Fall ist die Wärmestromdichte \dot{q} , die auf die Bauteiloberfläche einwirkt, bekannt. Man nennt dies die *Neumann* Randbedingung (Grigull, et al., 1990). Wie bereits bei der Konvektion eingeführt, nutzt man auch hier den Gradienten des letzten Schrittes für die Beschreibung der gesuchten Temperatur am Ort $n+1$.

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right)} \cdot (\vartheta_{n+1} - \vartheta_n) \cdot 2 \cdot \pi \cdot l = \dot{q} \cdot r_{n+1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \quad 4.3-18$$

Daraus wird:

$$\vartheta_{t,n+1} = A_5 \cdot \dot{q}_t + \vartheta_{t,n} \quad 4.3-19$$

mit folgender Festlegung:

$$A_5 := \frac{r_{n+1} \cdot \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right)}{\bar{\lambda}_t} \quad 4.3-20$$

Mit Hilfe der Gleichung 4.3-19 ist der Randbedingungsterm 4.3-3 bestimmt und mit ihm die beiden letzten Elemente der Koeffizientenmatrix und des Lastvektors.

$$R_{(n)} = -B_3 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot (A_5 \cdot \dot{q}_{t+} + \vartheta_{t+,n}) - B_1 \cdot \Gamma_{+,n} \cdot (A_5 \cdot \dot{q}_t + \vartheta_{t,n}) \quad 4.3-21$$

$$K_{(n,n)} = B_4 + B_3 \cdot \Gamma_{+,n} \quad 4.3-22$$

$$F_{(n)} = -(B_1 \cdot \Gamma_{-,n}) \cdot \vartheta_{t,n-1} - (B_2 + B_1 \cdot \Gamma_{+,n}) \cdot \vartheta_{t,n} - \Gamma_{+,n} \cdot A_5 \cdot (B_1 \cdot \dot{q}_t + B_3 \cdot \dot{q}_{t_+}) \quad 4.3-23$$

4.4 Bestimmung der Randbedingungen

4.4.1 Wärmeübergangskoeffizienten für den Nassdampf

An der Innenwand der Dampftrommel gibt der aus dem Verdampfer zurückgeführte Dampf Wärme an das Material ab. Durch den Nassdampf, kann es nicht nur zu Konvektion, sondern auch zu Kondensation kommen, nämlich wenn die Siedetemperatur des Dampfes unterhalb der Bauteilwandtemperatur fällt. Durch die ständigen Druckschwankungen und der damit verbundenen Schwankungen der Siedetemperatur sollen für die Dampftrommel zwei Berechnungen für den Wärmeübergangskoeffizienten verwendet werden. Für die Konvektion wird folgende Formel nach *Hausen* und *Gnielinski* (Cerbe, et al., 2008 S. 368) für das Übergangs- und Turbulenzgebiet verwendet.

$$\alpha_{t,\text{innen}} = \frac{\lambda_{\text{fluid},t}}{l_{\text{hydr}}} \cdot 0,012 \cdot (Re_t^{0,87} - 280) \cdot Pr_t^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_{\text{hydr}}}{l_{\text{Rohr}}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \left(\frac{273,15 + \vartheta_{t,\infty}}{273,15 + \vartheta_{t,0}} \right)^{-0,18} \quad 4.4-1$$

Darin werden in Abhängigkeit von der momentanen Dampfgeschwindigkeit, dem Druck und der Fluidtemperatur jeweils die *Reynolds*- und *Prandtl*-Zahl, sowie die Wärmeleitfähigkeit des Dampfes $\lambda_{\text{fluid},t}$ verwendet. Die charakteristische Länge l_{hydr} entspricht dem hydraulischen Durchmesser des Dampfraumes der Trommel (Zylinderhälfte). Dieser wird auch für die Berechnung der *Reynoldszahl* herangezogen.

$$l_{\text{hydr}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0^2}{\pi \cdot r_0 + 2 \cdot r_0} \quad 4.4-2$$

Die Rohrlänge l_{Rohr} wurde mit 2 Metern gewählt. Dennoch ist die Dampftrommel kein klassisches durchströmtes Rohr, vielmehr werden sich in ihrem Inneren die Ströme aufgrund der Abscheider und der anderen Einbauten irgendwie einstellen, bis der Dampf aus dem Austritt entweicht. Der Wert wurde mit der Überlegung gewählt, dass der Dampf aus den Abscheidern im Mittel eine Entfernung von etwa zwei Metern bis zum Austrittsstutzen zurücklegen muss.

Im Fall der Kondensation, wenn also die momentane Siedetemperatur des Dampfes oberhalb der Wandtemperatur liegt, wird folgende Gleichung nach *Grigull* angewendet (Cerbe, et al., 2008 S. 372).

$$\alpha_{t,\text{innen}} = \frac{\lambda_{\text{fluid},t}}{l_{\text{hydr}}} \cdot 0,003 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{\text{fluid},t}^3 \cdot g \cdot l_{\text{Kond}} \cdot (g_{s,t} - g_{t,0})}{\rho_{\text{fluid},t} \cdot v_t^3 \cdot (h_t'' - h_t')}} \quad 4.4-3$$

Darin werden wie schon bei der Konvektion alle Stoffdaten anhand der momentanen Werte für den Druck und die Dampftemperatur verwendet. Dabei wird jedoch ein konstanter Dampfgehalt von 0,97 angenommen. Dies gilt auch für Gleichung 4.4-1. Strauß (2006 S. 208) schreibt von Werten bis 0,98 bei gut ausgelegten Abscheidern. Die Länge der Kondensationsstrecke l_{Kond} wurde mit dem halben Innenradius angenommen. Die Gleichung gilt für senkrechte Wände und Rohre, da es sich hierbei jedoch um ein waagerechtes Rohr handelt, ist die Länge der Kondensationsstrecke willkürlich auf diesen Wert reduziert worden.

Um bei der Berechnung zu starke Schwankungen des Wärmeübergangskoeffizienten zu vermeiden, wird dieser über zwei Zeitschritte gemittelt, wobei die Prüfung, ob Konvektion oder Kondensation vorherrscht jeweils für beide Zeitpunkte getrennt voneinander stattfindet. Da die Wandtemperatur zum nächsten Zeitpunkt jedoch nicht bekannt ist, wird vereinfachen in beiden Fällen die Wandtemperatur zum aktuellen Zeitpunkt verwendet. Strenggenommen könnte hier ein iteratives Verfahren angewendet werden. Die Unsicherheit bei den Verwendeten Gleichungen wird vom Autor allerdings als höher eingeschätzt, sodass keine Iteration stattfindet. Die

Sensitivität der Ergebnisse auf Änderungen des Wärmeübergangskoeffizienten wird stattdessen später bei Variationsrechnungen eine Rolle spielen.

Auf den Diagrammen der Simulationsergebnissen ist auch der Zeitverlauf des Wärmeübergangskoeffizienten an der Bauteilinnenseite wiedergegeben (für die Dampftrommel im Anhang E.2, S. 144 ff.). Darauf sind Spitzenwerte von 6 000 bis 8 000 W/m²/K zu erkennen. Über längere Zeiträume bleibt der Wert unterhalb von 1 800 W/m²/K. Das deutet darauf hin, dass der Kondensationsfall nur selten auftritt. Gerade beim Anfahren des Kraftwerkes, wenn die Bauteiltemperatur der Siedetemperatur naheilt, sollte es zur Kondensation kommen. Dies geben die Diagramme wieder. Darüber hinaus kommt es an der Bauteilinnenwand auch bei größeren Schwankungen während des Betriebs zu einem Unterschreiten der Siedetemperatur und damit zur Kondensation (vgl. Bild E-7 und Bild E-8, S. 147 ff.). Die Bauteilwand muss dann nicht nur infolge der vom Prozess vorgegebenen hohen Temperaturtransienten, sondern auch durch den hohen Wärmeübergangskoeffizienten, eine besonders große Wärmeleistung verarbeiten.

Auf der vom Wasser benetzten Oberfläche der Dampftrommel kann es unter Umständen auch zum Sieden kommen, eben genau dann, wenn die Siedetemperatur unterhalb der Wandtemperatur liegt. Aufgrund der größeren Trägheit der Wassermasse wird dieser Teil der Bauteilwand nicht betrachtet.

4.4.2 Wärmeübergangskoeffizient für den überhitzten Dampf

Da die in dieser Arbeit betrachteten Bauteile am Ende der Überhitzerstrecke liegen, ist ein Phasenwechsel im Betrieb auszuschließen. Beim Anfahren des Kraftwerkes ist dies nicht der Fall. Sobald die im Verdampfer umgewälzte Wassermasse zu sieden beginnt, wird Dampf durch die Überhitzerstränge und die Umleitstationen in den Kondensator geführt. Alle Bauteile werden dann vom Dampf erwärmt, der an der Oberfläche kondensiert. Dies bleibt hier unberücksichtigt, da es in dem Zeitraum des Anfahrens infolge der Skalierungsmethoden ohnehin zu höheren Transienten kommt als bei der Referenzanlage. Praktisch werden die Änderungsgeschwindigkeiten des skalierten Prozesses beim Anfahren aber geringer sein. Hinzu kommt die Unklarheit inwieweit die Überhitzer beim Anfahren defokussiert werden. Dadurch, dass

Kondensation nicht betrachtet wird, kommt es in den Simulationen beim Anfahren zwar zu unrealistisch hohen Bauteiltemperaturen (weil stets angenommen wurde, dass die Strahlung voll einwirkt und der konvektive Wärmeübergang infolge des geringen Massenstromes sehr klein ist), dafür bleiben aber die Bauteiltemperaturdifferenzen gering, was zu keinen signifikanten thermischen Spannung führt. Dies sollte der Realität entsprechen, bei der zwar Kondensation eintritt, aber keine oder nur geringe Strahlung infolge der defokussierten Spiegel einwirkt.

Bei der Konvektion stehen für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten implizite und explizite Formeln zur Verfügung. Um den Rechenaufwand gering zu halten kommt eine explizite Formulierung nach *Mac Adams* zur Anwendung (Annaratone, 2008 S. 219).

$$\alpha_{t,\text{innen}} = \frac{\lambda_{\text{fluid},t}}{2 \cdot r_0} \cdot 0,0214 \cdot \left(1 + \frac{4,6 \cdot r_0}{l_{\text{SH}}}\right) \cdot Re_t^{0,8} \cdot Pr_t^{\frac{1}{3}} \quad 4.4-4$$

Reynolds-Zahl sowie *Prandtl*-Zahl werden in Abhängigkeit des momentanen Dampfzustandes und der Dampfgeschwindigkeit bestimmt. Da die Temperaturdifferenz zwischen Wand und Dampf hierbei keinen Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten hat, ist dieser bereits durch die Zeitverläufe der Prozessparameter Druck, Temperatur und Massenstrom bestimmt.

4.4.3 Bestrahlungsstärke auf dem Überhitzerrohr

Die Strahlung von der Sonne wird durch die parabolisch gekrümmten Spiegel auf das sogenannte Receiverrohr fokussiert, durch das der Dampf strömt. Die von der Solarstrahlung beschienene Fläche des Kollektors A_{Ap} ist durch die Breite b_{Ap} und Länge l_{Ap} gegeben (vgl. Bild 4-3).

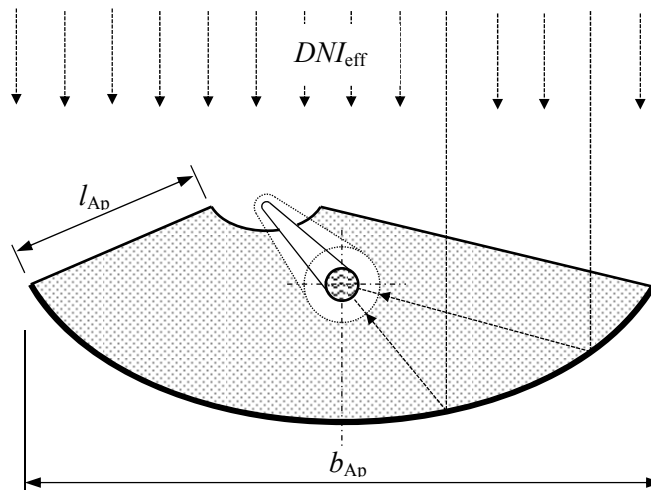


Bild 4-3: Prinzipieller Querschnitt eines Receiverrohres mit Parabolrinnenspiegel

Die momentane direkte Bestrahlungsstärke einer zur Strahlungsquelle senkrecht ausgerichteten Fläche wird als direkt-normale Bestrahlungsstärke DNI gemessen. Die Spiegel werden der Sonne im Laufe des Tages einachsrig nachgeführt. Je nach geographischer Breite und Jahreszeit steht die oben beschriebene Kollektorfläche nicht zwangsläufig senkrecht zur Sonne. Daher wird die direkt-normale Bestrahlungsstärke um diesen Winkel korrigiert, was auf DNI_{eff} führt. Die Brutto-Strahlungsleistung des Kollektors ist daher gleich der effektiven direkt-normalen Bestrahlungsstärke DNI_{eff} multipliziert mit der Kollektorfläche A_{Ap} .

Es wird angenommen, dass die Rohrachse auf Höhe der Kollektorschlenkel liegt. Damit ist die von der gebündelten Strahlung beschienene Fläche auf dem Rohr gleich der halben Mantelfläche und der Konzentrationsfaktor k ist gleich dem Verhältnis beider Flächen, wobei die Länge herausgekürzt wird. Mit den in dieser Arbeit verwendeten Daten wird ein Konzentrationsfaktor von knapp 42 erreicht.

$$k = \frac{b_{\text{Ap}}}{(r_s + e_s) \cdot \pi} = 41,8 \quad 4.4-5$$

Die Solarstrahlung trifft aufgrund verschiedener Einflüsse nicht ungemindert auf das Rohr auf, sodass noch ein Kollektorwirkungsgrad η_K eingeführt wird, der sowohl

optische als auch thermische Verluste beschreibt. Damit kann die momentane Nettostrahlungsleistung \dot{q}_t beschrieben werden.

$$\dot{q}_t = \eta_K \cdot k \cdot DNI_{\text{eff},t} \quad 4.4-6$$

Gründe für die Verluste können folgende sein. Die Spiegelflächen sind durch Staub verunreinigt. Die geometrische Form ist durch Toleranzen und Wärmedehnung nicht ideal und es kommt zu Fokussierungsverlusten. Die Glasröhre reflektiert und streut einen Teil der Strahlung, sie gibt darüber hinaus auch Wärme durch Konvektion an die Umgebungsluft ab. Das Rohr selbst reflektiert einen weiteren Teil der Strahlung. All diese Verluste werden durch äußere Einflüsse verändert, wie zum Beispiel die Windgeschwindigkeit oder den Einfallswinkel der Sonne. In dieser Arbeit wird der Wirkungsgrad als konstant angenommen. Krüger, et al. (2012) messen bei dem Kollektor der in der Referenzanlage eingebaut wurde einem thermischen Wirkungsgrad von bis zu 70 %. Eck, et al. (2005) sprechen bei einem anderen Kollektortyp von einem optischen Spitzenwirkungsgrad von 76,5 %. Da in dieser Arbeit die auf das Rohr auftreffende Strahlung interessiert ist, ist der optische Wirkungsgrad maßgeblich. Allerdings werden in dem Finite-Differenzen-Modell keine Verluste berücksichtigt, sodass ein verminderter Wert von 0,72 für den Kollektorwirkungsgrad η_K berücksichtigt wird.

Die Bestrahlungsstärke bei den Überhitzerrohren wird unter der Annahme aufgebracht, dass die Kollektoren permanent fokussiert sind. Die skalierten Prozesstemperaturen basieren jedoch auf Zeitreihen, bei denen die Spiegel abwechselnd defokussiert wurden. Daher schwankt die Dampftemperatur (vgl. Abschnitt 2.4.2). Diese Diskrepanz wird hingenommen, da einerseits keine Messdaten über die Fokussierung vorliegen und andererseits eine konservative Annahme getroffen wird. Die Dampftemperaturtransienten und die Strahlungstransienten treffen in voller Höhe auf das Rohr.

4.5 Umsetzung der Wandtemperatursimulation in MATLAB

Die in Abschnitt 4.3 wiedergegebenen Zusammenhänge sind in dem MATLAB Skript im Anhang unter G.3 (S. 222 ff.) programmiert. Der schematische Ablauf des Programms mit den wesentlichen Schritten ist in Bild 4-4 zu sehen. Das Programm erstellt die benötigten Vektoren und die Koeffizientenmatrix mit beliebigen Schrittweiten (örtlich und zeitlich). Diese werden zum Anfang des Programms festgelegt und bleiben während der Simulation unverändert. Unabhängig von der Zeitdiskretisierung geschieht das Speichern der Wandtemperaturen zu einem separat festgelegten Intervall.

Bei der Deklaration der temperaturabhängigen Materialdaten werden Polynome verwendet, dabei wird zwischen den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Werkstoffen unterschieden. Die Regression geschieht anhand der aus DIN EN 12952-3 entnommenen Angaben über die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und die Dichte. Wobei die Regression zuvor mit Hilfe des im Anhang G.2, S. 217 ff. abgedruckten MATLAB-Skripts durchgeführt wird.

Neben der eigentlichen Simulation unter Verwendung von externen Zeitreihen stehen einige Testlastfälle mit vorgegebenen Störgrößenverläufen zur Verfügung, um die Programmergebnisse zu verifizieren. Sofern die gewählte Zeitdiskretisierung nicht dem Intervall der Zeitreihe entspricht, wird eine lineare interpolierte Zeitreihe generiert. In diesem Fall wird auch die Zeitreihe für den Prozessdruck interpoliert, welche in diesem Programm nicht weiter verwendet wird, wohl aber für anschließende Berechnungen benötigt wird.

Die Bezeichnung der in Abschnitt 4.2 und 4.3 definierten Koeffizienten wird in das Programm übernommen, sodass eine Lesbarkeit des Codes erleichtert wird. Die Datenausgabe dient der Kontrolle. Es werden zwei Graphen erstellt. Ein 3D-Plot der Wandtemperatur über Radius und Zeit und ein Diagramm mit den beiden Fluidtemperaturen, den beiden Randtemperaturen und der mittleren Wandtemperatur über der Zeit.

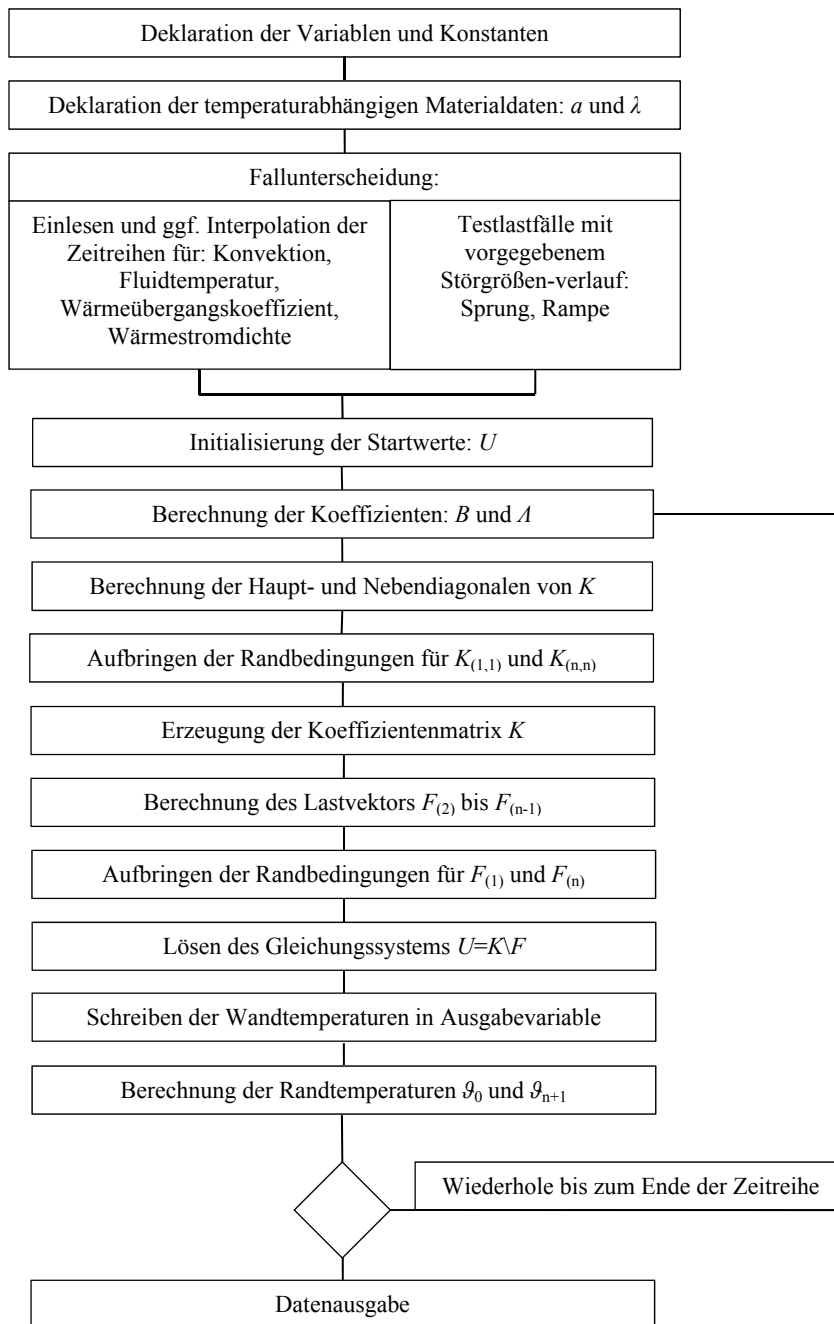


Bild 4-4: Prinzipieller Programmablaufplan für die Simulation der Wandtemperatur

4.6 Programmverifizierung

Um zu überprüfen, ob die Rechenergebnisse stimmig sind, die Randbedingungen korrekt aufgebracht wurden und die Diskretisierung ausreichend fein ist, sind die

Ergebnisse der Simulation zu verifizieren. Prinzipiell bieten sich mehrere Möglichkeiten, von denen hier vier beschrieben werden und im Programm unter den Testlastfällen 98 und 99 realisiert wurden.

Stationärer Wärmestrom bei Konvektion

Der stationäre Wärmestrom, der sich ausreichende Zeit nach einer Sprungantwort einstellt, ist bei Konvektion an beiden Grenzflächen für eine Zylinderwand analytisch aus den Randbedingungen bestimmbar (Cerbe, et al., 2008).

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{l} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\vartheta_{\text{fluid,aussen}} - \vartheta_{\text{fluid,innen}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{innen}} \cdot r_{\text{innen}}} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{aussen}}}{r_{\text{innen}}}\right) + \frac{1}{\alpha_{\text{aussen}} \cdot r_{\text{aussen}}}} \quad 4.6-1$$

Mit Gleichung 4.6-1 wird der längenbezogene Wärmestrom berechnet, da die hier abgebildeten Vorgänge unabhängig von der Länge sind. Der so berechnete Wert wird mit den ein- und austretenden längenbezogenen Wärmeströmen verglichen. Es muss dabei sichergestellt sein, dass die Simulationsdauer ausreichend lang ist, um den stationären Zustand zu erreichen. Da sich aber ein gewisser Fehler entweder aufgrund einer zu groben oder zu kleinen Diskretisierung (Rundungsfehler) nicht vermeiden lässt, sind geringfügige Abweichungen zuzulassen. Bei einer Testrechnung mit einer Zeitschrittweite von 1 s und einer Diskretisierung des Radius mit 50 Schritten lag der numerische längenbezogene Wärmestrom nach einer Sprungantwort (vgl. Bild E-1, S. 142) etwa 0,2 ‰ über dem theoretischen Wert aus Gleichung 4.6-1. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Randbedingungen richtig aufgebracht werden. Darüber hinaus ist die geringe Abweichung auch ein Indikator für eine solide Diskretisierung über den Radius.

Kumulierte Wärme bei Konvektion

Eine weitere Möglichkeit die Plausibilität des Programms zu überprüfen ist der Vergleich der analytisch berechneten inneren Wärmemengendifferenz und der kumulierten simulierten aus- und eintretenden Wärmemengen. Auch hierzu ist der stationäre Zustand nach einer Sprungantwort abzuwarten.

Mit Gleichung 4.6-1 ist der längenbezogene Wärmestrom aus den Randbedingungen bestimmt. Somit kann die stationäre Temperatur über dem Radius r folgendermaßen ausgedrückt werden (Cerbe, et al., 2008):

$$\vartheta_t(r) = \frac{\dot{q}}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_{\text{innen}}}\right) + \vartheta_{t,\text{innen}} \quad 4.6-2$$

Darin ist noch die Temperatur am inneren Rand zu berechnen. Auch sie ist aus den Randbedingungen eindeutig bestimmbar:

$$\vartheta_{t,1} = \vartheta_{\text{fluid,innen}} + \frac{\dot{q}}{\alpha_{\text{innen}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{innen}}} \quad 4.6-3$$

Die längenbezogene differenzielle Wärmemenge in einer differenziellen Schicht über dem Radius zwischen zwei Temperaturen ist analog zu den Gleichungen 4.1-3 und 4.1-4 bestimmbar.

$$dq = \frac{dQ}{l} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta\vartheta \cdot r \cdot dr \quad 4.6-4$$

Um die längenbezogene Energie zu bestimmen, wird die Gleichung über dem Radius integriert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Temperaturdifferenz vom Radius abhängt:

$$\Delta q = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c \cdot \int_{\text{innen}}^{\text{außen}} \Delta\vartheta \cdot r \cdot dr \quad 4.6-5$$

Bei der Beschreibung der Temperaturdifferenz geht man von einer konstanten Temperatur ϑ_{t_0} zu Beginn der Simulation aus. Der stationäre Temperaturverlauf ist bereits oben unter Gleichung 4.6-2 und 4.6-3 beschrieben, sodass gilt:

$$\Delta\vartheta(r) = \frac{\dot{q}}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_{\text{innen}}}\right) + \vartheta_{t,\text{innen}} - \vartheta_{t_0} \quad 4.6-6$$

Setzt man Gleichung 4.6-6 in 4.6-5 ein und integriert vom inneren zum äußeren Radius, so wird daraus die längenbezogene Energie, die das zylindrische Bauteil aufnimmt, um vom homogenen Anfangszustand ϑ_{t_0} auf den stationären Zustand bei einem längenbezogenen Wärmestrom \dot{q} zu gelangen:

$$\Delta q = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c \cdot \left[\frac{\dot{q}}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{r_a^2 \cdot \ln(r_a) - r_i^2 \cdot \ln(r_i)}{2} + \frac{r_i^2 - r_a^2}{4} \right) + \left(\vartheta_{t, \text{innen}} - \vartheta_{t_0} - \frac{\dot{q} \cdot \ln(r_i)}{\bar{\lambda}_t \cdot 2 \cdot \pi} \right) \cdot \frac{(r_a^2 - r_i^2)}{2} \right] \quad 4.6-7$$

Dabei hängt die Berechnung neben der Geometrie nur von den Rand- und Anfangsbedingungen ab und muss mit den kumulierten ausgetauschten Wärmemengen an den Grenzflächen verglichen werden. Hierzu werden für jeden Zeitschritt aus den Temperaturdifferenzen (zwischen Bauteilrand und Fluid) und den Wärmeübergangskoeffizienten die längenbezogenen Wärmestromdichten bestimmt und mit dem Zeitinkrement multipliziert, um die längenbezogene Energie zu bestimmen. Diese Werte werden dann über der Zeit kumuliert und mit dem Ergebnis aus 4.6-7 verglichen.

Bei der im Anhang E.1 auf Seite 142 abgedruckten Sprungantwort, der die oben angegebene Diskretisierung zugrunde liegt, ist die kumulierte aufgenommene Wärme etwa 1,8 % kleiner als der mit Hilfe von Gleichung 4.6-7 ermittelte Wert. Dabei werden die Stoffwerte als temperaturunabhängig, also konstant betrachtet, da es ansonsten aufgrund der Mittelung dieser Größen in Gleichung 4.6-7 größere Abweichungen gibt. Letztendlich liegt der Grund für die deutlich höhere Abweichung im Vergleich zur oben beschriebenen Methode (stationärer Wärmestrom) darin, dass sich der Fehler summiert.

Quasi-stationärer Temperaturgradient bei Strahlung

Anhand der Gleichung 4.1-4 kann die Speicherleistung des Bauteils im quasi-stationären Zustand (konstanter Temperaturgradient über der Zeit) berechnet werden. Diese sollte möglichst genau mit der konstanten Wärmestromdichte aus der Randbedingung übereinstimmen. Zur Vereinfachung wird als innere Randbedingung die

Isolation angewendet. Die Gradienten werden über dem Radius aufsummiert. Bei der Testrechnung mit der oben angegebenen Diskretisierung lag die numerische Speicherleistung des Bauteils etwa 0,1 % unterhalb der in der Randbedingung vorgegebenen Wärmestromdichte. Es kann somit angenommen werden, dass die Strahlungs- und Isolationsrandbedingung korrekt aufgebracht werden.

Kumulierte Wärme bei Strahlung

Auch bei der Aufbringung von Strahlung kann die eingebrachte längenbezogene Wärmemenge analytisch und numerisch berechnet und miteinander verglichen werden. Die theoretisch aufgenommene Leistung bei einer konstanten äußeren Wärmestromdichte \dot{q} entspricht:

$$\Delta q = \dot{q} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{aussen}} \cdot t_{\text{simulation}} \quad 4.6-8$$

Anhand der simulierten Temperaturen wird die aufgenommene Wärmemenge berechnet, indem die inkrementellen Wärmemengen der einzelnen Schichten summiert werden. In einer Testrechnungen (Diskretisierung wie oben angegeben) lag die kumulierte aufgenommene Wärmemenge des Bauteils nach 100 Minuten etwa 1,95 % über dem Wert, der mit Hilfe von Gleichung 4.6-8 berechnet wurde. Nach 200 Minuten stieg der Wert auf 1,99 %.

5 Bestimmung der Niedriglastwechselermüdung

5.1 Berechnung der Betriebsspannungen

5.1.1 Hintergrund

Mit den in Abschnitt 2 bestimmten Temperaturzeitreihen der Prozessdaten und den in Abschnitt 3 festgelegten Größen, wie Innendurchmesser, Wandstärke und Material, kann das transiente Berechnungsmodell aus Abschnitt 4 die Temperaturverteilung über der Bauteilwand und der Zeit bestimmen. Dabei wurden Annahmen der vernünftigerweise zu erwartenden Randbedingungen getroffen, um den skalierten Anlagenprozess abzubilden. Zusammen mit den Zeitreihen der Prozessdrücke liegen die Informationen vor, ähnlich wie sie bei dem Betrieb einer Anlage vorliegen. Auch bei dem Betrieb größerer Anlagen werden Bauteilwandtemperaturen und Prozessdrücke aufgezeichnet, um damit eine betriebsbegleitende Ermüdungsabschätzung durchführen zu können. Hierzu bietet die Norm für Wasserrohrkessel einen geschlossenen Ansatz (DIN EN 12952-4, 2011). Darin basiert die Spannungsberechnung auf zwei Temperaturmessungen, die repräsentativ für die Temperatur an der Innenwand (zum Medium hin) und die mittlere Wandtemperatur stehen. Aus technischen Gründen messen die beiden Fühler jedoch die Temperatur des Bauteils einige Millimeter von der Innenwand entfernt, sowie die Temperatur in der Mitte der Wand. Diese entspricht nicht zwangsläufig der mittleren Temperatur. Es existieren auch andere Möglichkeiten zur betriebsbegleitenden Spannungsberechnung, die zum Beispiel auf der Temperaturmessung von außen am Bauteil beruhen und dann einen FEM-Löser bemühen (Taler, et al., 2002). Dabei ist die Problematik im Kraftwerksbau nicht neu. Leithner, et al. (1990) diskutiert verschiedene Methoden zur Bestimmung der Temperaturdifferenz in dickwandigen Bauteilen. In der Praxis bestehen demnach Einschränkungen bei der Genauigkeit der Temperaturbestimmung. Dem transienten Berechnungsmodell, das in dieser Arbeit verwendet wird, werden im Sinne der Spannungsberechnung exakte Temperaturwerte entnommen, nämlich die Innenwandtemperatur und die über der Wand gemittelte Temperatur.

5.1.2 Bestimmung der Temperaturspannung

Bei der Wärmedehnungsbehinderung kommt es aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen über einer Bauteilwand zu Dehnungen, die wiederum Spannungen hervorrufen, da sie sich gegenseitig behindern. Bei der einaxialen Wärmedehnungsbehinderung einer ebenen Platte, ist die Spannung an dem wärmeren Rand gegeben durch den Elastizitätsmodul E , den Wärmeausdehnungskoeffizienten β , der mittleren Wandtemperatur $\bar{\vartheta}$ und der Temperatur am Innenrand ϑ_{innen} :

$$\sigma_{\text{th,innen}} = \beta \cdot E \cdot (\bar{\vartheta} - \vartheta_{\text{innen}}) \quad 5.1-1$$

Der wärmere Rand erfährt demnach Druckspannungen, wohingegen die kältere Seite Zugspannungen erfährt. Daher sind bei dem Betrieb prinzipiell zwei Momente kritisch. Und zwar das Aufheizen der Bauteile bei geringem Innendruck, da infolge der fehlenden Zugspannung (herrührend aus dem Innendruck) die thermischen Spannungen voll in den Druckspannungsbereich gehen. Der zweite kritische Moment ist das Absenken der Temperatur bei hohem Druck, da hier das Bauteil bereits durch die Innendruckbelastung unter hoher Zugspannung steht und diese durch weitere Zugspannung der dann kälteren Innenwand des Bauteils überlagert werden.

Bei der zweiaxialen ebenen Platte muss der Effekt der Querkontraktion berücksichtigt werden. Dies geschieht durch die Querkontraktionszahl ν , was in Gleichung 5.1-2 wiedergegeben ist. Bürgel (2006) liefert hierzu eine anschauliche Herleitung.

$$\sigma_{\text{th,innen}} = \frac{\beta \cdot E}{1 - \nu} \cdot (\bar{\vartheta} - \vartheta_{\text{innen}}) \quad 5.1-2$$

Mit einer charakteristischen Querkontraktionszahl für Stähle von 0,3 ist die Spannung bei der zweiaxialen Wärmedehnungsbehinderung um den Faktor 1,4 höher als bei dem einaxialen Fall. Bei den hier behandelten Bauteilen ist der zweiaxiale Fall zugrunde zulegen, da die Wände eine große Ausdehnung in zwei Richtungen besitzen.

Die Gleichung 5.1-2 gilt für ebene Platten, die keine Verschwächung durch Ausschnitte besitzen. Die Spannungsberechnung in dieser Arbeit geschieht unter Berücksichtigung eines Spannungskonzentrationsfaktors, der die bereits in Abschnitt 3.3 beschriebene Spannungserhöhung durch die Verschneidung zweier Zylinder berücksichtigt (DIN EN 12952-3, 2001). Wie gezeigt wurde, ist der Faktor maßgeblich vom Durchmesser Verhältnis abhängig (vgl. Bild 3-6 auf Seite 42). Aus den in Abschnitt 4 berechneten Wandtemperaturen ist die thermische Spannung in tangentialer Richtung an der Innenseite zu jedem Zeitpunkt t zu berechnen (vgl. Gleichung 5.1-3), wobei der Ausdehnungskoeffizient und der Elastizitätsmodul temperaturabhängig berücksichtigt werden. Dies geschieht mit der Temperatur an der Innenwand $\vartheta_{t,0}$.

$$\sigma_{\text{tan,th},t,0} = \alpha_t \cdot \frac{\beta_{t,0} \cdot E_{t,0}}{1 - \nu} \cdot (\bar{\vartheta}_t - \vartheta_{t,0}) \quad 5.1-3$$

Die sich daraus ergebende Zeitreihe ist ein Teil der Betriebsspannungen. Hinzu kommen die durch den Innendruck verursachten Spannungen auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

5.1.3 Bestimmung der Spannung aus dem Betriebsinnendruck

Die durch den Betriebsdruck hervorgerufenen Spannungen im Bauteil werden anders als bei der Dimensionierung in Abschnitt 3.1.2 nicht durch den Verschwächungsbeiwert berechnet, sondern über die bereits vorgestellten Spannungskonzentrationsfaktoren (vgl. Abschnitte 3.3). Beide Methoden sind DIN EN 12952-3 entnommen. Die Dimensionierung mit Hilfe des Verschwächungsbeiwertes beruht im Grunde auf einer gemittelten Spannung (vgl. Bild 3-2, Seite 33). Die Spannungsberechnung mit Hilfe der SKF berücksichtigt hingegen die Spannungsspitzen, die entsprechend über der mittleren Spannung liegen. Man nimmt dabei in Kauf, dass es unter Last im Bereich der Spannungsspitzen zu einer Plastifizierung kommt. Diese wird erst kritisch, wenn sie immer wiederkehrend wechselt und somit das Material ermüdet.

Die Druckspannung ist von der Bauteilwandtemperatursimulation in Abschnitt 4 unabhängig und ergibt sich direkt aus der skalierte Zeitreihe. Die Spannung an der

Innenfaser in tangentialer Richtung zum Zeitpunkt t , unter dem Innendruck p_t berechnet sich dann folgendermaßen.

$$\sigma_{\text{tan,p,t,0}} = \alpha_m \cdot \frac{d_{\text{is}}}{2 \cdot e_s} \cdot p_t \quad 5.1-4$$

Zusammen mit der tangentialen Spannung aus der Temperaturdifferenz aus Gleichung 5.1-3 ist damit die erste Hauptspannungen bekannt.

5.1.4 Bestimmung der Vergleichsspannung

Um hier eine Abgrenzung zu den in Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Methode der Spannungsberechnung zwecks Dimensionierung vorzunehmen, sind in Bild 5-1 die relevanten Spannungen aufgetragen. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein Ringelement zu sehen, welches keinen Abzweig enthält. Auf diesem zylindrischen Grundkörper basiert die in Abschnitt 4 durchgeführte Temperatursimulation. In der Abbildung ist die Temperaturverteilung zu einem Zeitpunkt dargestellt, zu dem eine Abkühlung stattfindet. Die Innenwandtemperatur ist geringer als die Außenwandtemperatur. Aus der Gleichung 5.1-2 ergibt sich der Verlauf der thermischen Tangentialspannung im unverschwächten Bereich $\sigma_{\text{tan,th,uv}}$.

Durch die Abkühlung verringert sich die Dehnung und die Innenfaser gerät unter Zugspannung. Die Zugspannung aufgrund von Innendruck $\sigma_{\text{tan,p,uv}}$ ist, soweit man weit genug von der Verschwächung entfernt ist, über der Wandstärke konstant und entspricht Gleichung 3.1-6. Wie schon erläutert, treten die maximalen Spannungen an der Innenfläche des Übergangs zwischen zwei Zylindern am Innenrand auf. Dieser ist im linken Teil der Bild 5-1 dargestellt. Der Rückschluss von den Spannungen an der Innenfaser des zylindrischen Grundkörpers auf die Spannungen am Lochrand geschieht mit Hilfe der vorgestellten Spannungskonzentrationsfaktoren. Dabei ist der Verlauf der Spannungen über der Wandstärke unbekannt und wird aus diesem Grund nicht in der Abbildung dargestellt. Auf eine Erläuterung soll dennoch nicht verzichtet werden.

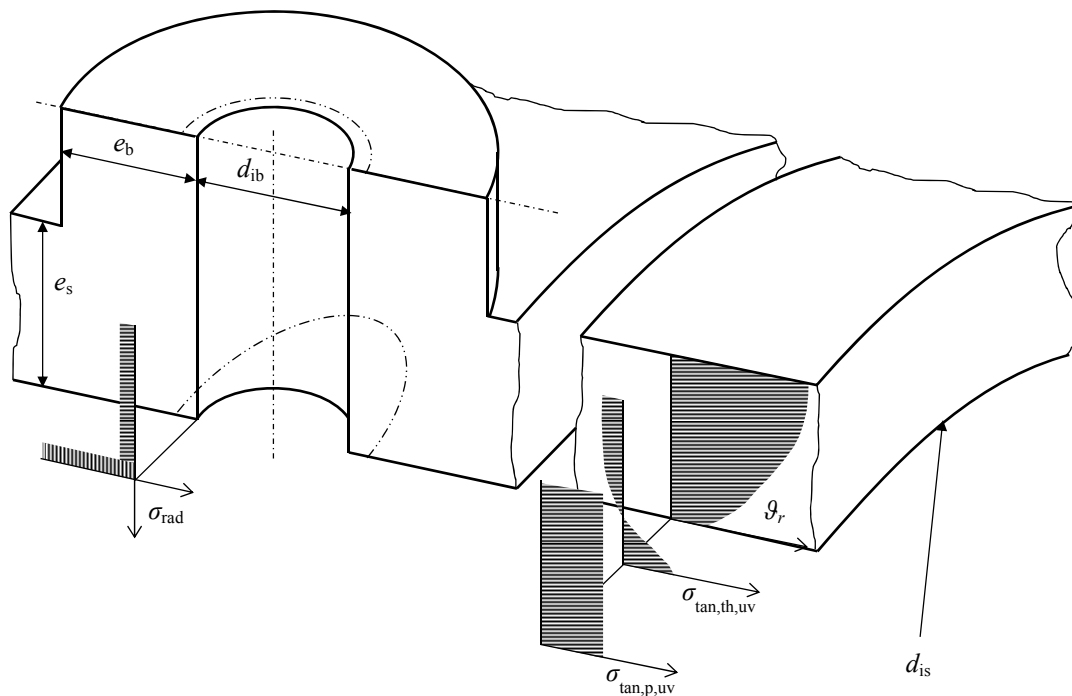


Bild 5-1: Verdeutlichung der Spannungen am freigeschnittenen Abzweig

Durch die thermisch verursachte Zugspannung erfährt der Lochrand eine Dehnung (vgl. Bild 3-7, Seite 43). Diese Dehnung ist zweiachsig. Die Form des Lochrandes unter Last ist in Bild 5-1 als strich-doppelpunktierter Ellipse angedeutet. Die Randfasern erfahren dabei eine Zugspannung in Umfangsrichtung (des Loches). Die durch den Innendruck verursachten Zugspannungen führen dazu, dass sich der Innenrand in tangentialer Richtung etwa doppelt so stark dehnt wie in Längsrichtung des Grundkörpers (vgl. Gleichung 3.1-3 und 3.1-4, Seite 31). Demgegenüber ist der Abzweig unter Innendruck bestrebt sich kreisförmig zu dehnen. Es tritt eine Verzerrung auf. Die Umfangsspannung des Loches wird dadurch weiter gesteigert. Dazu muss der Innendruck, der von zwei Seiten auf die Materialoberfläche wirkt, kompensiert werden, was in Bild 5-1 links dargestellt ist. Dies zeigt, dass der Lochrand unter Betriebsbelastungen Spannungserhöhungen ausgesetzt wird. Deren Einfluss soll durch die SKF berücksichtigt werden. Es wird deutlich, dass die Bauteilspannungen von vielen Einflussgrößen abhängen, die in einer einfachen Berechnung nicht alle vollumfänglich berücksichtigt werden können. Daher stellt diese Methode eine Näherung dar.

Anmerkend sei hier erwähnt, dass der volle Innendruck als Flächenpressung berücksichtigt wird, anders als bei der Dimensionierung, bei der dieser über der Wandstärke gemittelt wurde. Auch hier wird gemäß der Schubspannungshypothese die Vergleichsspannung aus der größten Differenz der beiden Hauptspannungen gebildet.

Zum Zeitpunkt t lautet diese:

$$\sigma_{v,t,0} = \alpha_m \cdot \frac{d_{ms}}{2 \cdot e_s} \cdot p_t + \alpha_t \cdot \frac{\beta_{t,0} \cdot E_{t,0}}{1 - \nu} \cdot (\bar{\vartheta}_t - \vartheta_{t,0}) + p_t \quad 5.1-5$$

Die Spannungsberechnungen aus den Zeitreihen für den Druck und die Wandtemperaturen erfolgt mit Hilfe des MATLAB-Skripts, dass im Anhang unter Abschnitt G.5 (S. 240 ff.) zu finden ist. Unabhängig von der Simulationsschrittweite bei der Wandtemperaturberechnung, wurde bei der Spannungsberechnung ein Zeitintervall von fünf Sekunden gewählt. In der Literatur wird für betriebsbegleitende Ermüdungsberechnungen beispielhaft eine Intervalllänge von einer Minute genannt (DIN EN 12952-4, 2011).

5.2 Lastwechselzählung

5.2.1 Identifizierung der Lastwechsel und deren maßgeblicher Größen

Die aus den Zeitreihen für den Prozessdruck und die Wandtemperaturdifferenz berechnete Spannungszeitreihe folgt prinzipiell dem Prozess. Im Stillstand der Anlage, d.h. ohne Druck und ohne Temperaturänderungen, sind die Bauteilspannungen gering. Wie später gezeigt wird, kommen die Spannungen nicht vollständig zur Ruhe, da die Plastifizierung unter Last zu Eigenspannungen führt, die auch ohne Prozessbelastungen anstehen. In Bild 5-2 ist das Spannungs-/ Dehnungsdiagramm für einen beliebigen Bauteilschnitt dargestellt. Im Punkt A wird das Bauteil theoretisch spannungsfrei in Betrieb genommen. Mit steigender Prozesstemperatur beim Anfahren der Anlage entstehen die thermischen Spannungen. Der Druck wird ebenfalls gesteigert. Das Bauteil dehnt sich unter Spannungszunahme elastisch von A nach B. Durch hohe Spannungskonzentrationen im betrachteten Schnitt kommt es bei weiterer Belastungssteigerung zu dem beschriebenen plastischen Fließen. Die

Spannungen steigen nicht mehr linear mit der Dehnung. Die Anlage befindet sich im Bereich der Volllast. Bei hohen Temperaturen spielt auch das Kriechen eine Rolle, bei dem die Dehnung unter konstanter Spannung zunimmt. Wird die Prozesstemperatur bei hohem Prozessdruck gesenkt, kommt es aufgrund der thermischen Spannungen zu einer weiteren Erhöhung der Zugspannung. Im Punkt C ist die maximale Dehnung (und Spannung) erreicht, für die das Bauteil bzw. der Schnitt ausgelegt wurde. Der abnehmende Prozessdruck entlastet das Bauteil. Spannung und Dehnung nehmen elastisch ab. Da die Membranspannungen, d.h. die über der Wandstärke gemittelte Spannung, jedoch im elastischen Bereich geblieben ist (Voraussetzung bei der Dimensionierung), werden die zuvor unter Zugspannungen plastifizierten Ränder beim Abstellen der Anlage unter der Kraft des umliegenden elastisch gebliebenen Materials bis zum Punkt E gestaucht. Dabei kommt es erneut zu einem Fließen. Die Anlage ist nun drucklos und abgekühlt. Hier wird deutlich, dass die Randspannungen nicht verschwinden, auch wenn die Belastungen aus dem Prozess nicht mehr anstehen.

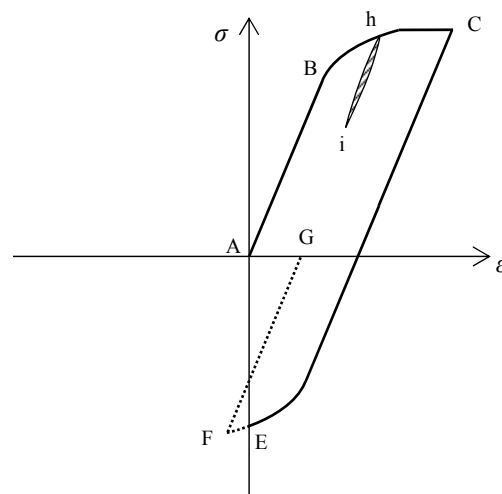


Bild 5-2: Spannungs-/Dehnungsverhalten im Betriebszyklus

Beim erneuten Anfahren nimmt die Stauchung wegen des Aufheizvorganges weiter zu (Punkt F), um dann durch den ansteigenden Prozessdruck in den Zugspannungsbereich zu gelangen (ab Punkt G). Theoretisch schließt sich die Hysterese im Spannungs-/Dehnungsdiagramm dort, was einem Lastwechsel entspricht. Durch die bleibende Dehnung, die durch das Kriechen hervorgerufen wurde, liegen G und A

nicht am selben Ort. Mit steigender Betriebszeit wandert die Schleife also stetig in Richtung zunehmender Dehnung.

Im Betrieb unterliegt ein Bauteilschnitt wechselnden Belastungen, die sich im Spannungs-/Dehnungsdiagramm als Unterbrechung der umschließenden „Kaltstarthysterese“ darstellen lassen. In Bild 5-2 ist dies anhand der Punkte h und i verdeutlicht. Dieses wechselnden Belastungen stellen für sich wiederum geschlossene Hystereseschleifen dar, die als Lastwechsel anzusehen sind (DIN EN 12952-4, 2011). Ob diese Betriebslastwechsel in einem solarthermischen Direktverdampferkraftwerk einen wesentlichen Anteil darstellen, ist die zentrale Fragestellung dieser Arbeit.

Die unter Abschnitt 5.1.4 bestimmten Vergleichsspannungen bilden den Ausgangspunkt für die Lastwechselzählung und die Bestimmung der charakteristischen Lastwechselgrößen. Durch die kontinuierliche Messwerterfassung stellt nicht jeder Wert der Zeitreihe einen Eckpunkt für einen Lastwechsel dar. Es interessieren demnach nur die relativen Extremwerte der Vergleichsspannung. Das sind diejenigen Werte, bei denen die Steigung des Spannungsverlaufs das Vorzeichen wechselt. Der zeitliche Zusammenhang, d.h. die Zeit zwischen den Extremwerten spielt dabei keine Rolle mehr, da die Kriechschädigung bei diesem Ansatz separat betrachtet werden muss (Bürgel, 2006). Aus der gesamten Zeitreihe der Vergleichsspannung wird jeder Wert gelöscht, der kein relatives Extremum darstellt.

Die relativen Extremwerte der Vergleichsspannung sind in Folge daraufhin zu untersuchen, ob eine große Spannungsänderung von einer kleineren Spannungsänderung in umgekehrter Richtung unterbrochen wird. Die kleinere Änderung wird dann eine geschlossene Hystereseschleife bewirken (DIN EN 12952-4, 2011). Die beteiligten Extrema bilden einen Lastwechsel. Diese Vorgehensweise ist in Bild 5-3 dargestellt. Angedeutet ist ein möglicher Verlauf der Vergleichsspannungszeitreihe in Form der gestrichelten Linie. Die durchgezogene dünne Linie beinhaltet die relativen Extrema aus dieser Zeitreihe. Die relativen Extremwertpaare a-b, c-d und e-f bilden jeweils einen geschlossenen Lastwechsel, da sie eine Unterbrechung eines jeweils größeren Lastwechsels darstellen. Die Lastwechselzählung geschieht mit Hilfe eines Zählalgorithmus, der über die Zeitreihe läuft. Um in der Zeitreihe alle Lastwechsel

zu erkennen, ist es nötig, die bereits identifizierten Lastwechsel aus der Zeitreihe zu eliminieren und den Algorithmus über die gekürzte Zeitreihe laufen zu lassen. Dies geschieht solange, bis kein geschlossener Lastwechsel mehr vorhanden ist. In der Abbildung ist zu sehen, dass nach Eliminierung der drei oben genannten Paare, ein weiterer, größerer Lastwechsel auftaucht, nämlich gebildet durch das Paar B-C. Die so entstehende Restextremwertfolge enthält die Punkte A und D.

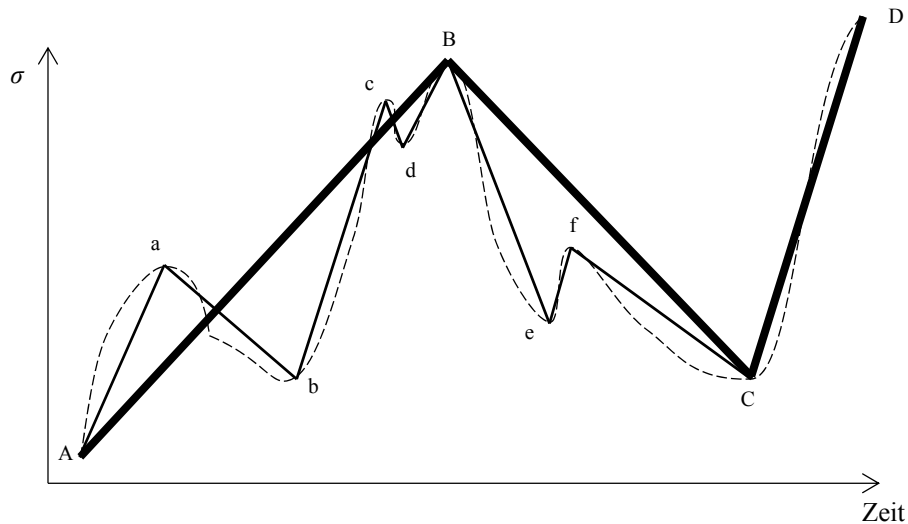


Bild 5-3: Erkennung von Lastwechseln anhand der relativen Extrema der Vergleichsspannung

Jeder der gefundenen Lastwechsel ist charakterisiert durch drei Größen, seine Mittelspannung σ_{mittel} , seine Spannungsschwingbreite σ_{va} und seine maßgebende zyklische Temperatur ϑ_* . Sie sind durch die größere σ_o und die kleinere der beiden Spannungen σ_u , sowie die größere ϑ_o und kleinere Bauteilwandtemperatur ϑ_u gegeben. Die Indices beziehen sich auf den größeren und kleineren Wert der jeweiligen Größe, nicht auf denselben Zeitpunkt zu dem die Spannung und die Temperatur anstehen. Die höhere Spannung muss nicht zwangsläufig bei der höheren Temperatur auftreten.

$$\sigma_{\text{mittel}} = 0,5 \cdot (\sigma_o + \sigma_u) \quad 5.2-1$$

$$\sigma_{va} = |\sigma_o - \sigma_u| \quad 5.2-2$$

$$\vartheta_* = 0,75 \cdot \vartheta_o + 0,25 \cdot \vartheta_u \quad 5.2-3$$

Die Identifizierung der Lastwechsel, sowie die Registrierung der drei charakteristischen Größen geschieht mit Hilfe des MATLAB-Skriptes im Anhang unter G.5 (S. 240 ff.).

5.2.2 Bestimmung der Ermüdung

Aus den drei charakteristischen Größen eines jeden Lastwechsels ist die Anzahl an möglichen Zyklen zu ermitteln, nach der mit einem Riss zu rechnen ist. Diese Zahl wird als Anrisszyklenzahl N_a bezeichnet. Diese entsteht durch entsprechende Versuche, wobei eine Reduktion der maximalen Spannung um 2 % als Kriterium herangezogen wird (Bürgel, 2006). Dabei gilt dies laut Norm bereits als Versagenskriterium (DIN EN 12952-4, 2011). Bevor die Anrisszyklenzahl für jeden registrierten Lastwechsel bestimmt werden kann, muss die maßgebliche temperaturkorrigierte Spannungsschwingbreite $\sigma_{a,9}$ ermittelt werden. Dies ermöglicht es, die registrierten Lastwechsel mit der experimentell ermittelten Anrisszyklenzahl N_A zu vergleichen. Dabei entspricht die hier verwendete Berechnung der Auslegungsnorm für Wasserrohrkessel (DIN EN 12952-3, 2001).

Für die maßgebliche Spannungsschwingbreite sind drei Fälle zu unterscheiden, die in Bild 5-4 dargestellt sind. Es handelt sich dabei einmal um den elastischen Fall, bei dem die Summe aus dem Betrag der mittleren Spannung und der halben Schwingbreite unterhalb der temperaturabhängigen Dehngrenze liegt (die Dehngrenze bezieht sich auf die maßgebliche Temperatur des Lastwechsels, vgl. Gleichung 5.2-3). Der zweite Fall findet im teilplastischen Bereich statt. Dafür muss die Summe aus dem Betrag der mittleren Spannung und der halben Schwingbreite oberhalb der temperaturabhängigen Dehngrenze liegen. Dabei darf die halbe Spannungsschwingbreite jedoch nicht größer als diese Dehngrenze sein. Der dritte Fall ist dann gegeben, wenn die halbe Spannungsschwingbreite bereits die Dehngrenze überschreitet.

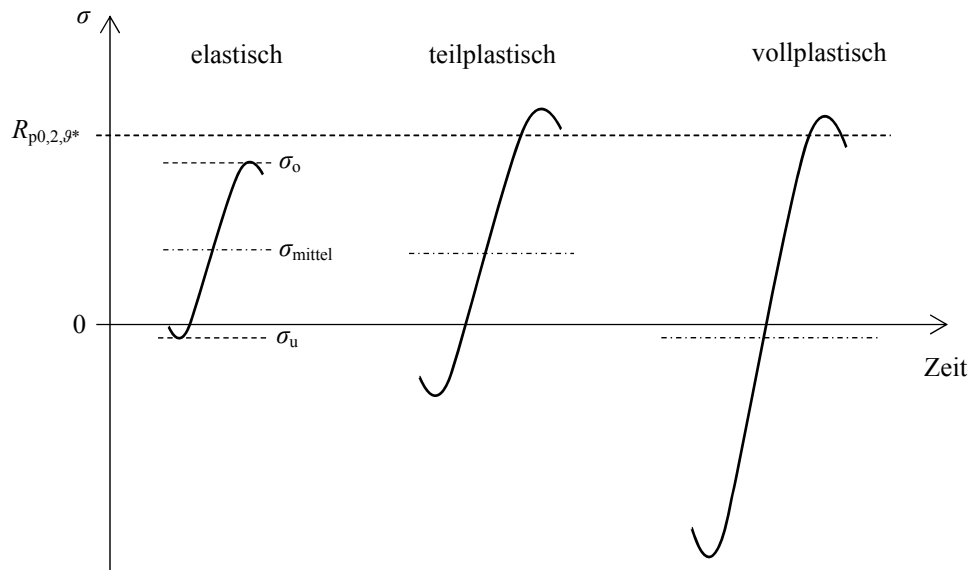


Bild 5-4: Fallunterscheidung für die Bestimmung der maßgeblichen Spannungsschwingbreite

Für den elastischen Fall ist Gleichung 5.2-4 zu verwenden, für den teilplastischen Fall Gleichung 5.2-5 und für den plastischen Fall Gleichung 5.2-6, um auf die maßgebliche Spannungsschwingbreite zu kommen.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{va}}{1 - \left(\frac{\sigma_{mittel}}{R_m}\right)^2} \quad (\text{elastisch}) \quad 5.2-4$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{va}}{1 - \left(\frac{R_{p0,2,9*} - 0,5 \cdot \sigma_{va}}{R_m}\right)^2} \quad (\text{teilplastisch}) \quad 5.2-5$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{va}^2}{2 \cdot R_{p0,2,9*}} \quad (\text{plastisch}) \quad 5.2-6$$

Diese drei Formeln sollen den Einfluss der Mittelspannung auf die Anrisslastwechselzahl berücksichtigen. Weiter ist der Einfluss der Temperatur mit Hilfe des Temperaturkoeffizienten C_{9*} zu berücksichtigen. Hierbei wird zwischen ferritischem und austenitischem Material unterschieden.

$$C_{9*} = 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 9_* - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 9_* \quad (\text{Ferrit}) \quad 5.2-7$$

$$C_{9*} = 1,043 - 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 9_* \quad (\text{Austenit}) \quad 5.2-8$$

Die maßgebliche temperaturkorrigierte Spannungsschwingbreite zur Ermittlung der Anrisszyklenzahl lautet dann:

$$\sigma_{a,9*} = \frac{\sigma_a}{C_{9*}} \quad 5.2-9$$

Es ist zu erkennen, dass der Temperatureinfluss bei ferritischen Werkstoffen größer ist. So beträgt der Temperaturkoeffizient bei ferritischem Material bei 500 °C etwa 0,58 und beim Austenit 0,82. Mit der maßgeblichen temperaturkorrigierten Spannungsschwingbreite ist man in der Lage die Anrisszyklenzahl N_A aus den empirischen Werten für einen ungekerbten Probekörper bei Raumtemperatur ohne Mittelspannung zu bestimmen (DIN EN 12952-3, 2001). Dabei gilt die folgende Gleichung für die Mittelwerte des Streubereiches.

$$N_A = \left(\frac{173150 - 0,8 \cdot R_m}{\sigma_{a,9*} - 0,8 \cdot R_m} \right)^{\frac{1}{0,547}} \quad 5.2-10$$

Wird diese Gleichung zur maßgeblichen Spannungsschwingbreite umgestellt und in Abhängigkeit der Anrisszyklenzahl dargestellt, erhält man Bild 5-5. Aus Gleichung 5.2-10 ist zu sehen, dass die Anrisszyklenzahl N_A gegen unendlich konvergiert, wenn die Spannungsschwingbreite $\sigma_{a,9*}$ gegen 80 % der Bruchfestigkeit R_m läuft. Zumindest unter den Bedingungen, unter denen die Anrisszyklenzahl im Versuch ermittelt wurde, ist unterhalb dieser Schwingbreite auch bei beliebig häufiger Zyklenzahl nicht mit einem Bruch zu rechnen.

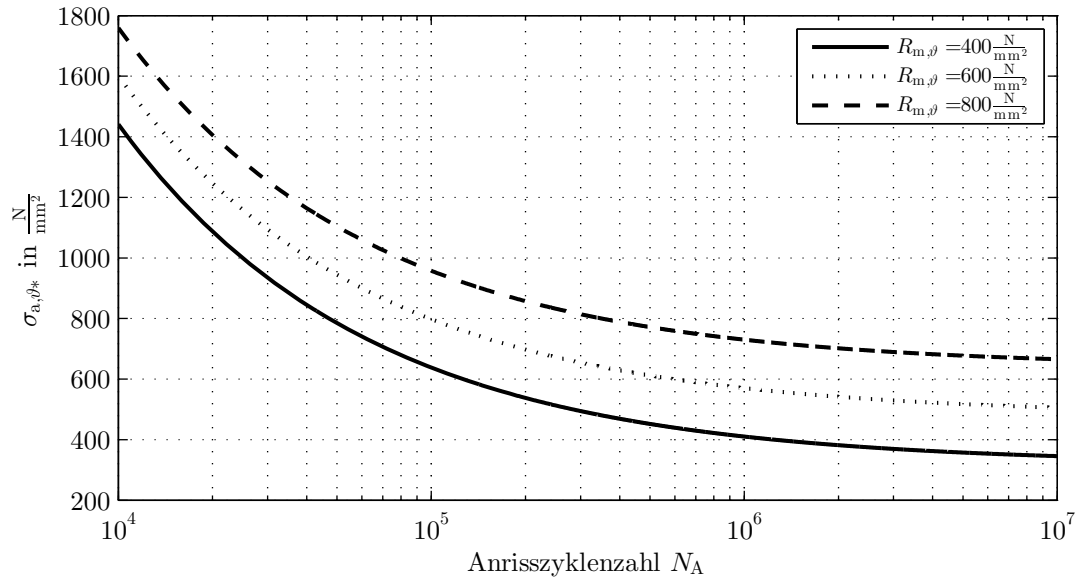


Bild 5-5: Anrisszyklenzahl N_A eines ungekerbten Probestabes bei Raumtemperatur ohne Mittelspannung (Mittelwert der Streubreite)

Um den unteren Streubereich der Gleichung 5.2-10 zu erfassen gibt die Norm zwei Sicherheitsfaktoren an. Einer davon ($S_s=1,5$) bezieht sich auf die mit Gleichung 5.2-9 errechnete Spannungsschwingbreite. Der andere Sicherheitsfaktor ($S_L=10$) bezieht sich direkt auf die Anrisszyklenzahl. Die für die Schädigung maßgebliche Anrisszyklenzahl $N_{A,S}$ entspricht dann dem kleineren Wert.

$$N_{A,S} = \min \left\{ N_A \left(S_S \cdot \sigma_{a,9*} \right); \frac{1}{S_L} \cdot N_A(\sigma_{a,9*}) \right\} \quad 5.2-11$$

Jeder registrierte Lastwechsel kann ins Verhältnis zu der unter den jeweiligen Parametern theoretisch erreichbaren Anrisszyklenzahl gesetzt werden und stellt eine inkrementelle Schädigung dar, die aufaddiert werden kann. Dies entspricht der linearen zyklischen Schädigungsakkumulationsregel nach *Palmgren* und *Miner* (Bürgel, 2006). Darin ist also der inkrementelle Schaden eines Lastwechsels ΔD_i unter der Parameterkombination i gegeben aus dem Kehrwert der Anrisszyklenzahl unter der Parameterkombination.

$$\Delta D_i = \frac{1}{N_{A,S,i}} \quad 5.2-12$$

Die Gesamtschädigung nach oben genannter Regel ist die Summe aller k Einzelschädigungen.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{1}{N_{A,S,i}} \quad 5.2-13$$

Danach würde der Anriss theoretisch auftreten, wenn der Wert 1 erreicht ist. Dies ist in der Praxis nicht immer der Fall, wobei es laut Bürgel (2006) sowohl zu Abweichung nach oben als auch nach unten kommt. Als einen konservativen Richtwert für die maximal zulässige Schädigung findet man in der Literatur den Wert 0,4. Laut Auslegungsnorm für Wasserrohrkessel können darin auch die Kriechschädigungen enthalten sein. Bürgel (2006) spricht bei Anwendung dieses Wertes allgemein von einem mehrstufigen Belastungskollektiv. Es wird deutlich, dass die rechnerische Abschätzung der Lebensdauer nicht isoliert betrachtet werden kann. In den Anlagen liefern diese betriebsbegleitenden Rechnungen Anhaltspunkte für die Alterung der Bauteile und für die Planung der Anlagenstillstände für Inspektionen. Eine genaue Aussage über den Zustand der Bauteile kann nur eine Materialprüfung ergeben. Ein Beispiel hierfür findet sich anhand von Dampfturbinenrotoren in einer Richtlinie des VGB (VGB-R 512 M, 2003).

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Berechnungen sind in dem MATLAB-Skript untergebracht, dass im Anhang unter G.5 (S. 240 ff.) abgedruckt ist. Darin werden für jeden Lastwechsel die vorgestellten Größen berechnet. Solange die maßgebliche temperaturkorrigierte Spannungsschwingbreite unterhalb von 80 % der Bruchfestigkeit liegt, ist die inkrementelle Schädigung gleich 0.

5.2.3 Bewertung der Restextremwertfolge

Aus den Überlegungen zur Identifizierung der Lastwechsel wird deutlich, dass es eine Restextremwertfolge geben muss, in der kein in sich geschlossener Lastwechsel vorhanden ist, der als Unterbrechung eines größeren Lastwechsel angesehen werden kann (vgl. Bild 5-3, S. 81). Die Restextremwertfolge besteht daher immer aus einem Teil mit stetig ansteigender Amplitude, gefolgt von einem Teil mit stetig kleiner werdender Amplitude. In der Restextremwertfolge sind damit immer auch der erste

und letzte Wert aus der ursprünglichen Zeitreihe sowie das Maximum und Minimum enthalten. In jeder der vorliegenden Zeitreihen ist der Anlagenwarmstart am Morgen und das Abstellen der Anlage am Abend zu sehen (vgl. Abbildungen unter Anhang C, S. 125 ff.). D.h., dass die Restextremwertfolge mit Startwert, Endwert Maximum und Minimum jeweils einen kompletten Warmstartzyklus enthält. Dazu können weitere große Lastzyklen enthalten sein. Im Rahmen dieser Arbeit ist der Warmstartzyklus von geringer Bedeutung, da die Überlegung dahingeht, dass dieser Lastzyklus bei der Auslegung berücksichtigt werden muss und in seinen Eckpunkten bereits bei der Auslegung bekannt ist. Das gesamte Ermüdungsverhalten im heißen Anlagenbetrieb gilt hingegen bei der Auslegung der Bauteile als unbekannt und soll hier untersucht werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die Restextremwertfolge weitere Lastzyklen enthalten kann und auch, weil der Warmstartlastwechsel in seiner Größe als Referenz dienen kann, muss die Restextremwertfolge bewertet werden. Hier kommt das Rain-Flow-Verfahren (Ariduru, 2004) zum Einsatz. Danach wird jeder verbliebene Ast der Restextremwertfolge als halber Lastwechsel gezählt. Grundsätzlich bieten sich mehrere Möglichkeiten an, die Lastzyklen der Restextremwertfolge zu zählen (DIN EN 12952-4, 2011). Da das Rain-Flow-Verfahren bereits als Grundlage für die in Abschnitt 5.2.1 vorgenommene Zählung gedient hat, erscheint es naheliegend, dieses Verfahren auch bei den Restextremwerten anzuwenden.

Für jeden einzelnen Ast der Restextremwertfolge werden wie bereits zuvor die maßgebliche temperaturkorrigierte Spannungsschwingbreite und die sich daraus ergebene maßgebliche Anrisszyklenzahl bestimmt. Die inkrementelle Schädigung bezieht sich dann aber auf den halben Zyklus, nämlich 0,5.

6 Ergebnisse der Ermüdungsberechnung

6.1 Die Ermüdung in den einzelnen Schnitten

Die in Abschnitt 5 beschriebene Spannungs- und Ermüdungsberechnung wird für jeden der fünf Referenztage und für jeden Schnitt durchgeführt. Eine der beiden wesentlichen Größen ist die Anzahl der schädigenden Lastzyklen, also diejenige Anzahl von Zyklen, bei der die maßgebliche temperaturkorrigierte Spannungsschwingbreite größer als 80 % der Bruchfestigkeit ist. Eine kleinere Spannungsschwingbreite führt rechnerisch nicht auf eine Anrisszyklenzahl (vgl. Gleichung 5.2-11). Die zweite wesentliche Größe aus den Berechnungen ist die Gesamtschädigung D .

Werden die Ergebnisse für jeden Schnitt über alle fünf Referenztage aufaddiert, so erhält man das in Bild 6-1 dargestellte Diagramm. Die Bezeichnung der Schnitte ist abgekürzt.

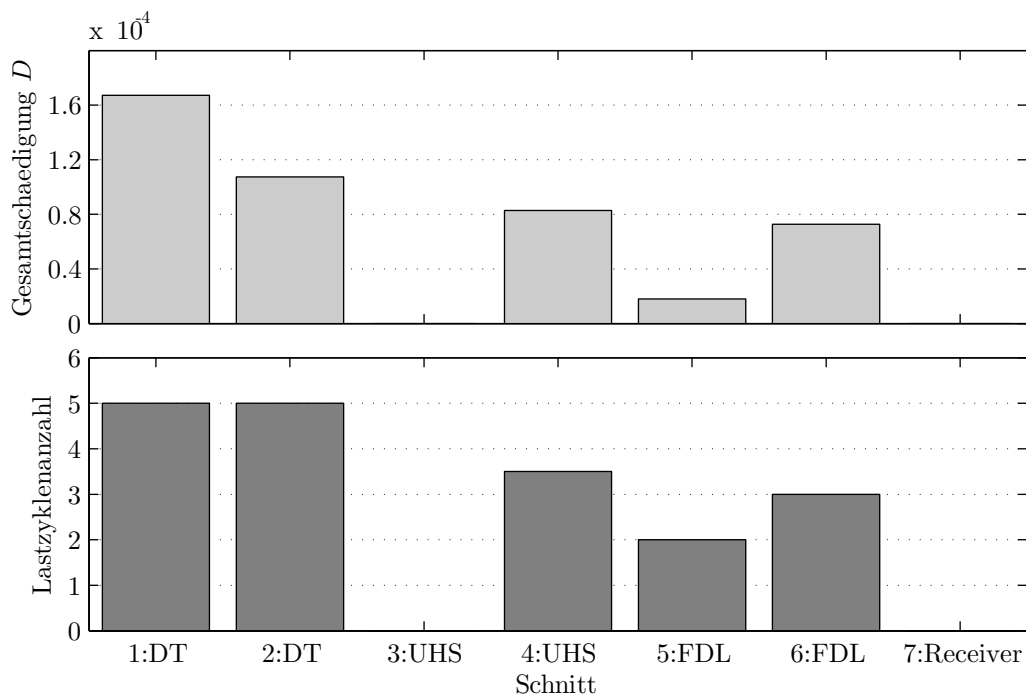


Bild 6-1: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Hinter den ersten beiden Schnitten verbirgt sich die Dampftrommel mit der Dampfleitung zum Überhitzerfeld (Schnitt 1) und dem kleineren Stutzen (Schnitt 2). Es

wurde gezeigt, dass große Stutzen hohe Spannungskonzentrationen aus dem Innendruck bewirkten und kleine Stutzen hohe Spannungskonzentrationen aus den Temperaturunterschieden über der Wand bewirkten. Für diese beiden Schnitte sind im Vergleich zu den anderen Schnitten die höchsten Werte für die Schädigung zu erkennen. Außerdem weisen sie die höhere Lastzyklenzahlen auf.

Um den Zahlenwert der Schädigung in seiner Größenordnung zu interpretieren, wird angenommen, dass das Bauteil eine spezifizierte Lebensdauer von 25 Jahren hat und die Gesamtschädigung danach den Wert 0,2 nicht überschreitet. Bei einer Verfügbarkeit von 93 % wäre das Kraftwerk etwa 340 Tage pro Jahr im Einsatz. Über die Betriebsdauer verteilt, dürfte die Schädigung unter den getroffenen Annahmen innerhalb von fünf Betriebstagen den Wert von $1,2 \times 10^{-4}$ nicht überschreiten. Der Wert 0,2 für die Gesamtschädigung am Ende der Lebensdauer ist im Hinblick auf die in der Literatur zu findende Grenze von 0,4 für die Kriecherschöpfung und Lastwechselermüdung gewählt. Es wurde vereinfachend angenommen, dass beide Schädigungen zu gleichen Anteilen auftreten. Die Kriechschädigung wird bei der Dampftrommel aufgrund der niedrigen Temperaturen jedoch eine untergeordnete Rolle spielen. Noch zu berücksichtigen ist dabei, dass die Kaltstarts und Lastabwürfe zur Schädigung hinzukommen. Es wird deutlich, dass beide Schnitte der Dampftrommel bereits im Bereich der für die Lebensdauer relevanten Schädigung arbeiten. Bei den hier gewählten SKF fällt der Einfluss des Innendruckes größer aus als derjenige der Temperatur. Beide Schnitte erfahren innerhalb der fünf Tage fünf Lastzyklen. Dies deutet bereits darauf hin, dass es sich ausschließlich um die Warmstartbelastung handelt.

Anders als bei der Dampftrommel treten beim Überhitzersammler und bei der Frischdampfleitung die temperaturkritischen Bereiche hervor (Schnitte 4 und 6). Die Darstellung in Bild 6-1 beruht für diese beiden Schnitte auf der skalierten gemittelten Temperatur aus den sechs in Betrieb gewesenen Überhitzersträngen. Diese weist im Gegensatz zu der gemessenen Frischdampf Temperatur einen steileren Anfahrtemperaturgradienten auf, der zu größeren Temperaturdifferenzen $\bar{\vartheta}_t - \vartheta_{t,0}$ in der Wand führt. Dies ist den Diagrammen im Anhang E zu entnehmen, beispielsweise Bild E-24 und Bild E-25 (S. 164 f.). Einen Vergleich der Skalierungsmethoden liefert Tabelle 2-2 auf Seite 28. Für alle in Abschnitt 6.2 durchgeführten

Sensitivitätsrechnungen ist die Skalierungsmethode verwendet worden, die die gemittelte Überhitzer-Austrittstemperatur verwendet.

Auch die Frischdampfleitung im Bereich eines großen Abzweigs (Schnitt 5) ist von schädigenden Lastwechseln betroffen. Hierbei wurde die über alle sechs Überhitzerstränge gemittelte Temperatur bei der Skalierung berücksichtigt (Datensatz 5, vgl. Tabelle 2-2 auf Seite 28). Die Schädigung für den Schnitt 5 wird zu null, wenn die skalierte Frischdampf Temperatur anstelle der skalierten gemittelten Überhitzer-Austrittstemperatur verwendet wird (vgl. Bild 6-2).

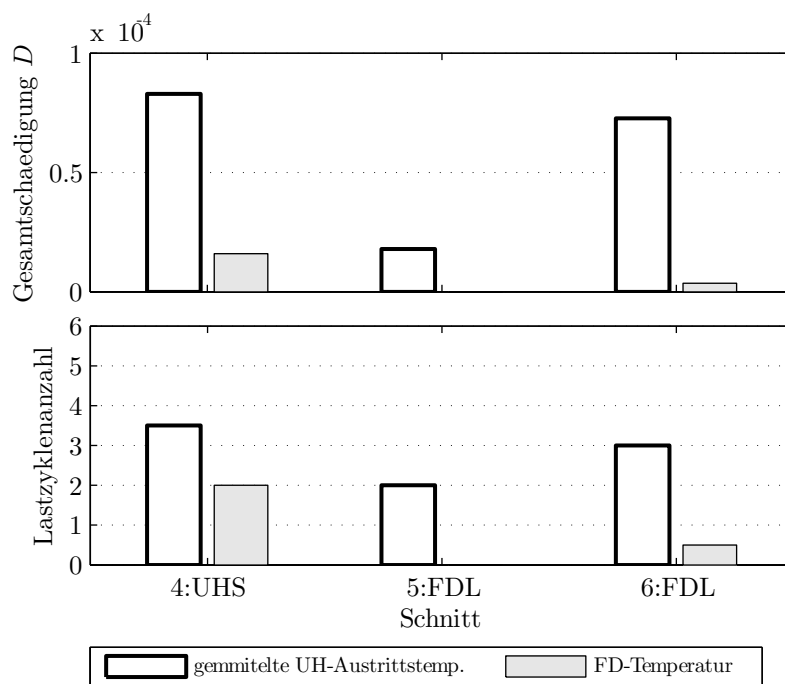


Bild 6-2: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl summiert über die fünf Referenztage für die unterschiedlichen Skalierungsmethoden (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Der Überhitzersammler im Bereich des ersten Stranges (kleinster Querschnitt des ÜHS, Schnitt 3) weist keinerlei schädigende Lastzyklen auf. Dazu sei erwähnt, dass diese Aussage für alle drei Skalierungsmethoden (vgl. Abschnitt 2.4, S. 20 ff.) zutrifft. Der Receiver (das Überhitzerrohr, Schnitt 7) bleibt ungeachtet der Skalierungsmethode ebenfalls ohne rechnerische Schädigung. Ein Rückblick auf die Simulationsergebnisse (vgl. Anhang E.5, S. 174) zeigt die aufgrund der geringen Wandstärke kleinen Temperaturdifferenzen. Darüber hinaus wird das Rohr nicht wie die anderen Schnitte durch einen Abzweig verschwächt. Daher liegen beide

Spannungskonzentrationsfaktoren bei 1, was zu deutlich geringeren Spannungsspitzen führt.

Die oben über alle fünf Tage summierte Schädigung soll in Bild 6-3 für einen Schnitt und einen Tag näher betrachtet werden. Dazu wurde eine Darstellungsform gewählt, die den Zeitraum des Lastzyklus bzw. der -zyklen verdeutlicht. Im oberen Bereich des Diagramms ist die inkrementelle Schädigung über der Zeit aufgetragen. Die Linien verbinden den Anfangs- und Endpunkt jedes Zyklus miteinander und geben die durch den jeweiligen Zyklus hervorgerufene Schädigung an. Im unteren Teil der Darstellung sind die Vergleichsspannung (vgl. Formel 5.1-5, S. 78) und die thermische Spannung aufgetragen, die wiederum in der Vergleichsspannung enthalten ist.

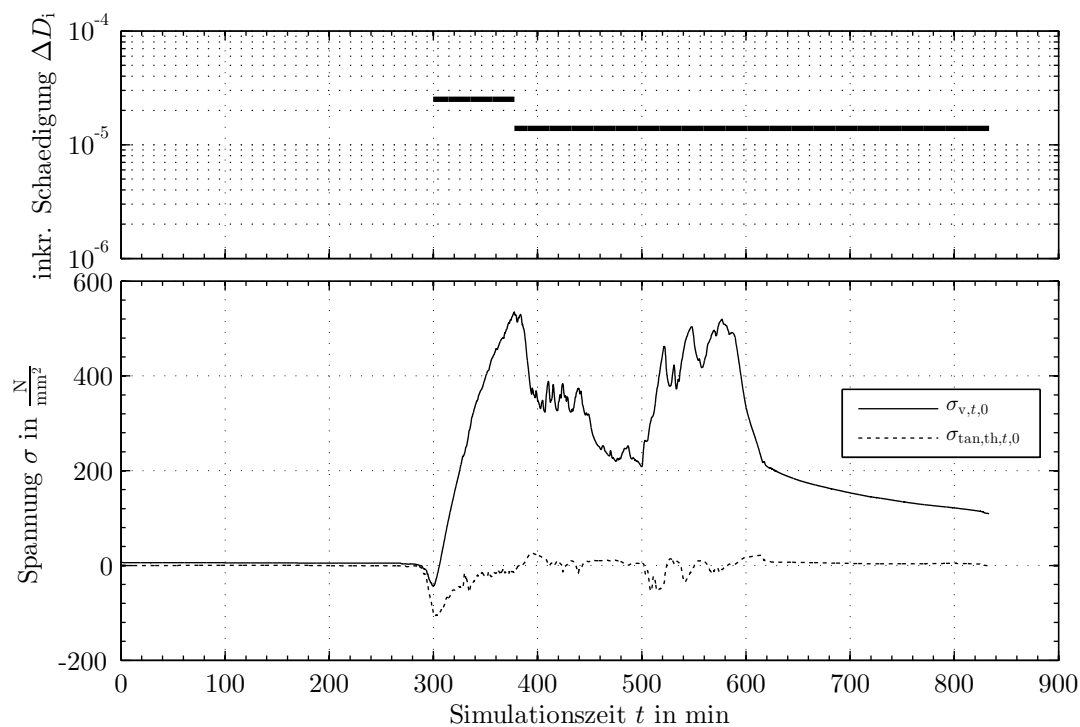


Bild 6-3: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 1) am 1. Juni 2012

In Bild 6-3 ist erkennbar, dass der erste Lastzyklus beim Anfahren beginnt und etwa dort endet, wo die erste Spannungsspitze auftritt. Dieser Zyklus weist zugleich die höhere Schädigung auf. Die Temperaturspannungen, die beim Anwärmen der Behälterwand entstehen und aufgrund des noch geringen Behälterinnendruckes zu einer negativen Vergleichsspannung führen, sind deutlich zu sehen. Der zweite Zyklus

schließt nahtlos daran an und endet mit den letzten Messdaten. Die Simulationsergebnisse zu dieser Darstellung sind in Bild E-7 (S. 147) im Anhang E.2 zu finden. Ein schädigender Lastwechsel im Bereich der Betriebsschwankungen zwischen An- und Abfahren des Blockes ist nicht vorhanden.

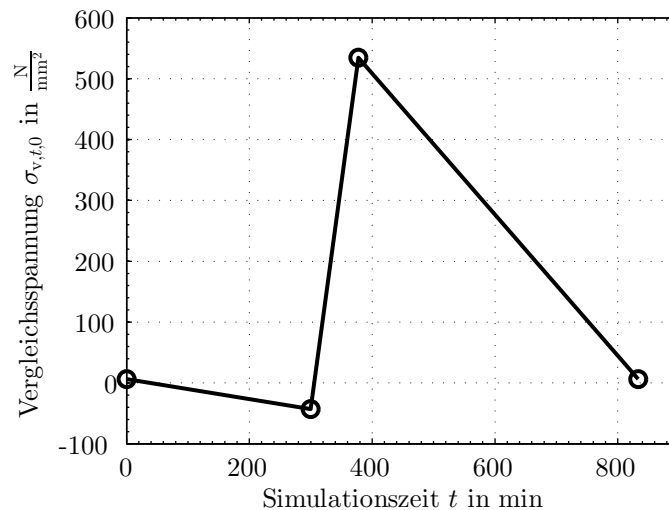


Bild 6-4: Restextremwertfolge für die Dampftrömmel (Schnitt 1) am 1. Juni 2012

Einen weiteren Einblick verschafft die Restextremwertfolge für die oben dargestellte Schädigungsberechnung. Sie ist in Bild 6-4 dargestellt. Zur Erinnerung, die Restextremwertfolge enthält diejenigen relativen Extremwerte der Vergleichsspannung, dessen Wertepaare keine größeren Lastwechsel unterbrechen. Definitionsgemäß enthält diese mindestens den Start- und Endpunkt, sowie das größte Maximum und das kleinste Minimum der Vergleichsspannung. Dies gibt auch die Darstellung in Bild 6-4 wieder. Im Vergleich zu Bild 6-3 sind die beiden Lastzyklen wiederzuerkennen, wobei bei der Ermittlung der Schädigung davon ausgegangen wurde, dass der letzte Messwert nicht das Ende des Zyklus darstellt. Vielmehr wird das Kraftwerk über Nacht weiter abkühlen und der Druck wird ebenso absinken. Damit sinkt auch die Spannung ab. Am nächsten Morgen sollte sich dann in etwa der gleiche Zustand einstellen, wie am vorherigen Tag, zu Beginn der Rechnung. Daher wurde der letzte Wert der Restextremwertfolge gleich dem ersten Wert gesetzt. So ist der Unterschied zwischen Bild 6-3 und Bild 6-4 am rechten Ende zu erklären. Würde die Schädigungsberechnung mit dem Ende der Messwertreihe abschließen, würde man einen Teil der Schwingbreite vernachlässigen. Jedoch auch das hier geschilderte Vorgehen vernachlässigt einen

Teil der Schädigung, da der Abstell-Zyklus grundsätzlich erst abgeschlossen ist, wenn das Kraftwerk wieder anfährt und das zuvor erwähnte absolute Spannungsminimum erreicht wird. Dann käme man auf zwei halbe Zyklen mit gleichen Schädigungswerten. Die hier gewählte Darstellung suggeriert dagegen, dass das Abstellen des Kraftwerkes weniger schädigend sei. Dies ist nicht korrekt und nur zulässig, da die Warmstart und Kaltstartschädigungen nicht Kern dieser Arbeit darstellen und deren absolute Zahlenwerte von untergeordneter Bedeutung sind. Wenn diese Schädigungen von Interesse sind, dann ist die Restextremwertfolgen über mehrere Tage hinweg zu betrachten und auszuwerten. Abschließend wird dadurch auch erklärt, warum manche Berechnungstage nur einen halben Lastzyklus ausweisen, der meistens aus dem Anfahrvorgang herrührt. Beim Abstellen erreicht die maßgebliche temperaturkorrigierte Schwingbreite dann gerade nicht 80 % der Bruchfestigkeit.

	Basis	Sensitivitätsrechnungen				
		Wandstärke	Innendurchmesser	Wärmeübergang	SKF	Phasenversatz
Datensatz für: Dampftrommel	1	1	1	1	1	1
Überhitzerrohr	2, 3 und 4	3	3	3	3	3
Überhitzersammler	5 und 6	5	5	5	5	5
Frischdampfleitung	5 und 6	5	5	5	5	5
Wärmeübergang	$f(p, \vartheta, \dot{m})$	$f(p, \vartheta, \dot{m})$	$f(p, \vartheta, \dot{m})$	$f(p, \vartheta, \dot{m})$ variiert; konstant	$f(p, \vartheta, \dot{m})$	$f(p, \vartheta, \dot{m})$
Innendurchmesser	gemäß Tabelle 3-1	variiert	variiert	konstant	konstant	konstant
Wandstärke	gemäß Tabelle 3-1	variiert	konstant	konstant	konstant	konstant
SKF	gemäß Tabelle 3-1	konstant	konstant	konstant	variiert	konstant

Tabelle 6-1: Übersicht über die in der Basisrechnung und der Variationen veränderten Parameter

In den Variationsrechnungen im folgenden Abschnitt gilt es die Sensitivität auf die Veränderung einzelner Parameter zu erfassen. Dazu bietet Tabelle 6-1 eine einleitende Übersicht. Darin sind als Vergleich ebenfalls die Parameter dargestellt, die in die sogenannte Basisrechnung eingeflossen sind, deren Ergebnisse in diesem Abschnitt vorgestellt wurden. Für ausgesuchte Schnitte bei denen schädigende Last-

zyklen aufgetreten sind, finden sich die Schädigungs-/Spannungsdiagramme gemäß Bild 6-3 unter Anhang F (S. 202 ff.).

6.2 Sensitivitätsbetrachtungen

6.2.1 Veränderung der Wandstärke

Bei der Festlegung der Wandstärke wurde unterstellt, dass die Warmdehngrenze bzw. die Zeitstandfestigkeit unter Einbeziehung der Sicherheitsfaktoren vollkommen ausgenutzt wird. In der Praxis ergibt sich bereits durch die Abstufung der gefertigten Flacherzeugnisse bzw. Rohrleitungen eine gewisse Überdimensionierung. Hinzu kommen Zuschläge für Korrosion und Erosion, sodass die Wandstärken größer ausfallen als hier angenommen. Daher wurden alle Simulationen und Schadensberechnungen mit steigender Wandstärke und gleichbleibendem Innendurchmesser gerechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 6-5 aufgetragen. Es ist zu sehen, dass eine Wandstärkenvergrößerung zunächst zur Reduktion der Schädigung und teilweise auch zur Reduktion der Lastzyklenanzahl führt.

Die Bauteilspannungen nehmen infolge des Flächenzuwachses ab. Anscheinend ist die damit verbundene Vergrößerung der Wandtemperaturdifferenz von untergeordneter Bedeutung. Dies liegt daran, dass die Wärmespannungen betragsmäßig deutlich geringer ausfallen als die Druckspannungen. Bei der Dampftrommel beträgt die Druckspannung bei der Referenzwandstärke (75 mm) etwa das Viereinhalbfache der Temperaturspannung (vgl. Bild 6-6). Bei der um 30 % gesteigerten Wandstärke ist die Temperaturspannung betragsmäßig bereits halb so groß (vgl. Bild 6-7). Dabei sinkt die Spannungsamplitude noch ab, was zu einer Verringerung der Schädigung führt. Ab einer gewissen Überdimensionierung nimmt die Schädigung wieder zu, denn die Temperaturspannung steigt prinzipiell mit dem Quadrat der Wandstärke (Effenberger, 2000). Die Druckspannung nimmt hingegen linear ab. Dies ist in Bild 6-5 bei der doppelten Wandstärke für die Frischdampfleitung sowie den Überhitzersammler (Schnitt 4) deutlich zu erkennen.

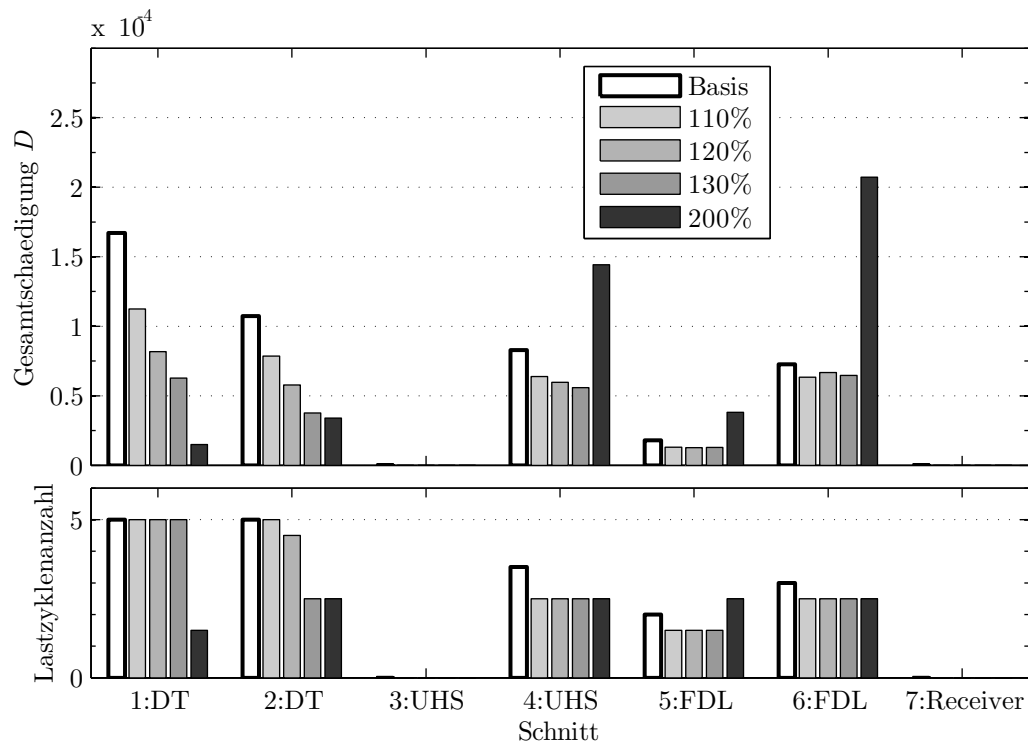


Bild 6-5: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation der Wandstärke des Grundkörpers e_s zwischen 100 bis 200 % (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Die Schädigung in diesen Schnitten nimmt zu, allerdings führt selbst die Verdopplung der Wandstärke noch nicht dazu, dass die Schwankungen während des Betriebs zur Schädigung beitragen. Dies wird ersichtlich, da die Anzahl der schädigenden Zyklen noch unterhalb von fünf bleiben.

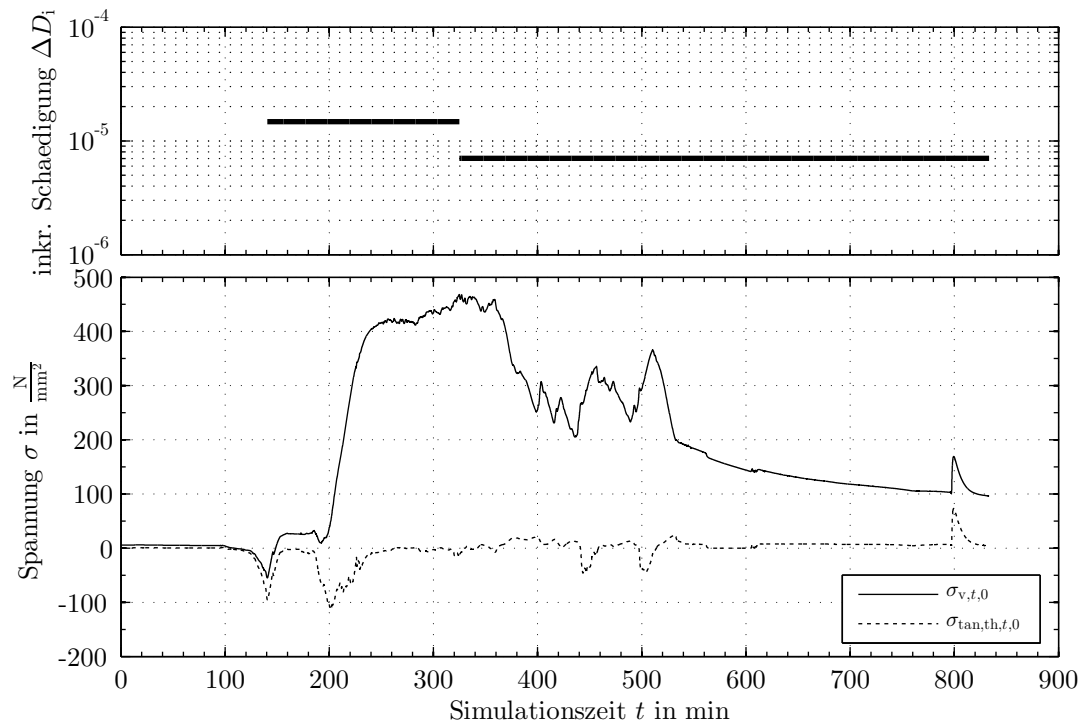


Bild 6-6: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 2), 04.06.2012

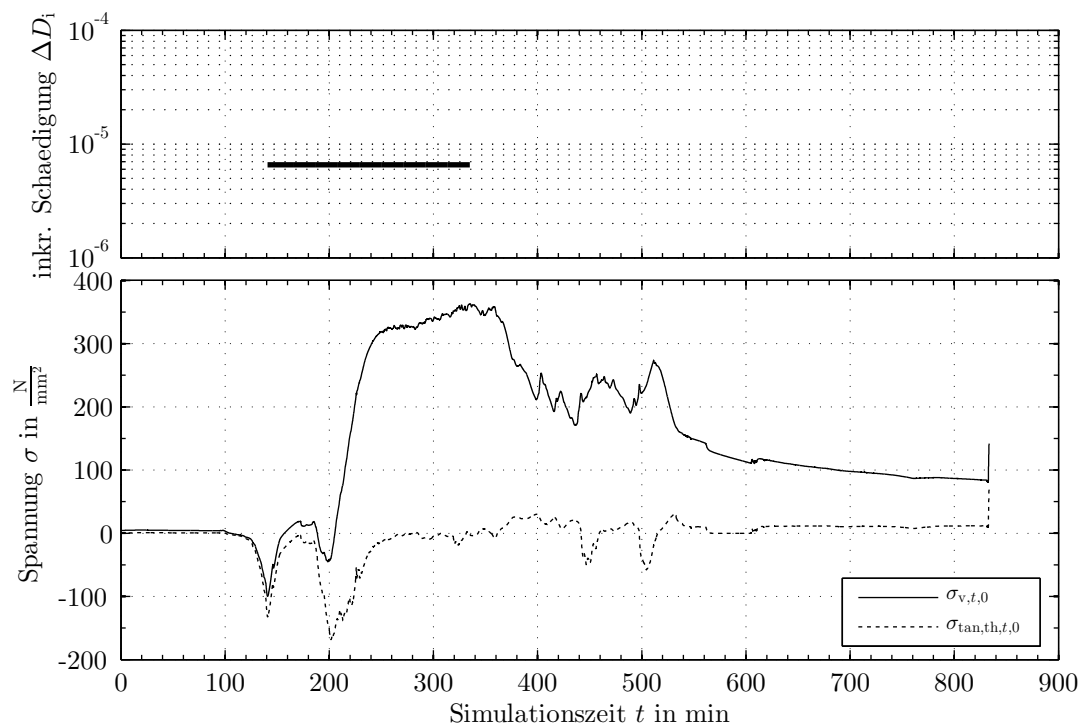


Bild 6-7: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrommel (Schnitt 2) mit 130% Wandstärke, 04.06.2012

6.2.2 Veränderung des Innendurchmessers

Neben der Wandstärke stellt der Innendurchmesser eine weitere konstruktive Größe dar, die in dieser Arbeit zwar anhand der Massenströme festgelegt wurde, aber in der Praxis weiteren Faktoren unterliegt. Aus diesem Grund wurden die Simulationen mit steigendem Innendurchmesser gerechnet. Dabei muss auch die Wandstärke mit skaliert werden, um die steigenden Bauteilspannungen zu kompensieren. Bei dieser linearen Skalierung der Bauteilgröße, bleiben sowohl die Verschwächung als auch die SKF konstant (vgl. Tabelle 6-1, S. 93). Die Ergebnisse sind in Bild 6-8 dargestellt.

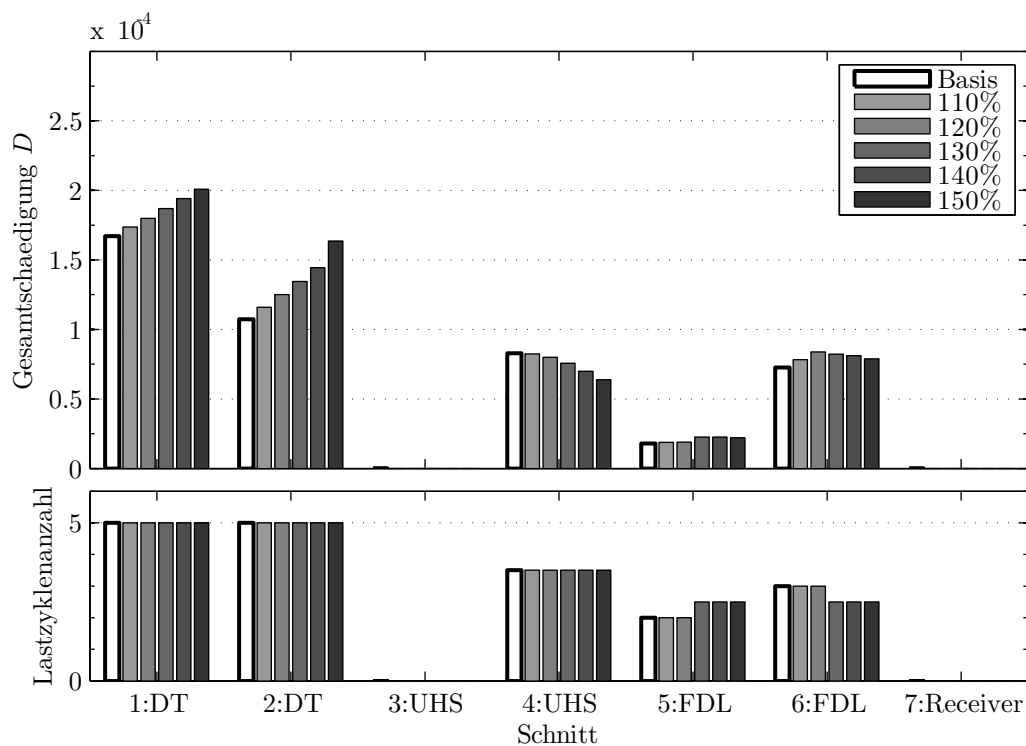


Bild 6-8: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des Innendurchmessers d_i zwischen 100 und 150 % (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Auf den ersten Blick ist darin kein einheitliches Bild zu erkennen. Die Schnitte der Dampftrummel zeigen den erwarteten Effekt: die Schädigungen steigen an. Die Druckspannungen bleiben infolge der skalierten Wandstärken gleich hoch. Die Temperaturspannungen steigen jedoch an. Aus diesem Grund ist Schnitt 2 auch von einer deutlicheren Steigerung der Schädigung betroffen als Schnitt 1, da dort die

größeren SKF für die Temperaturspannung gelten (kleiner Abzweig vgl. Abschnitt 3.3, S. 38 ff.).

Die Schnitte des Überhitzersammlers und der Frischdampfleitung zeigen teilweise eine umgekehrte Sensitivität. Um das zu erläutern muss erwähnt werden, dass die Zeitreihe für den Massenstrom bei der Skalierung unverändert blieb. Mit dem größeren Innendurchmesser verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit deutlich und der in der Simulation berechnete Wärmeübergang sinkt. Beim Anfahren ist die Bauteiltemperaturdifferenz trotz des verringerten Wärmeübergangs bei dem skalierten Innendurchmesser größer. Die Thermischen Spannungen sind daher höher. Gleichzeitig bleibt die Bauteilinnenwandtemperatur aber im Vergleich zur Simulation mit dem Referenzdurchmesser geringer. Dies liegt am geringeren Wärmeübergang. Daraus folgt, dass bei der Bestimmung der maßgeblichen temperaturkorrigierten Spannungsschwingbreite eine kleinere maßgebende zyklische Temperatur zugrunde liegt. Die rechnerische Schädigung ist daher geringer. Zum Beispiel ist dies für den Überhitzersammler am 4. Juni 2012 deutlich sichtbar. Auf der folgenden Seite zeigt Bild 6-9 die Simulationsergebnisse unter Basisbedingungen. Bild 6-10 zeigt die Variation mit 150% Innendurchmesser. Beide Simulationen weisen etwa 200 Minuten nach dem Start die größte Wandtemperaturdifferenz auf. Die größere Wandstärke besitzt dabei eine etwas höhere Temperaturdifferenz. Die Randtemperatur liegt zu dem Zeitpunkt jedoch etwa 100 K unterhalb derjenigen mit der Referenzwandstärke. Die Schädigungs- und Spannungsverläufe dieser beiden Beispiele sind in Bild F-4 auf Seite 203 und Bild F-9 auf Seite 206 abgedruckt.

Bei der Dampftrömmel tritt dieser Effekt nicht auf, weil der Wärmeübergang in der Simulation insbesondere beim Start durch Kondensation bestimmt ist und daher durch die Variation des Innendurchmessers nicht beeinflusst wird. Beim Anfahren tritt auch im Überhitzersammler und der Frischdampfleitung Kondensation auf. Es handelt sich bei der Darstellung der mit dem Innendurchmesser abnehmenden Schädigung in Bild 6-8 für den Überhitzersammler daher um einen simulationsbedingten Effekt. Er macht jedoch deutlich, dass der Wärmeübergang beim Anfahren nicht nur über die Wandtemperaturdifferenz auf die Schädigung Einfluss nimmt, sondern auch über die absolute Temperatur.

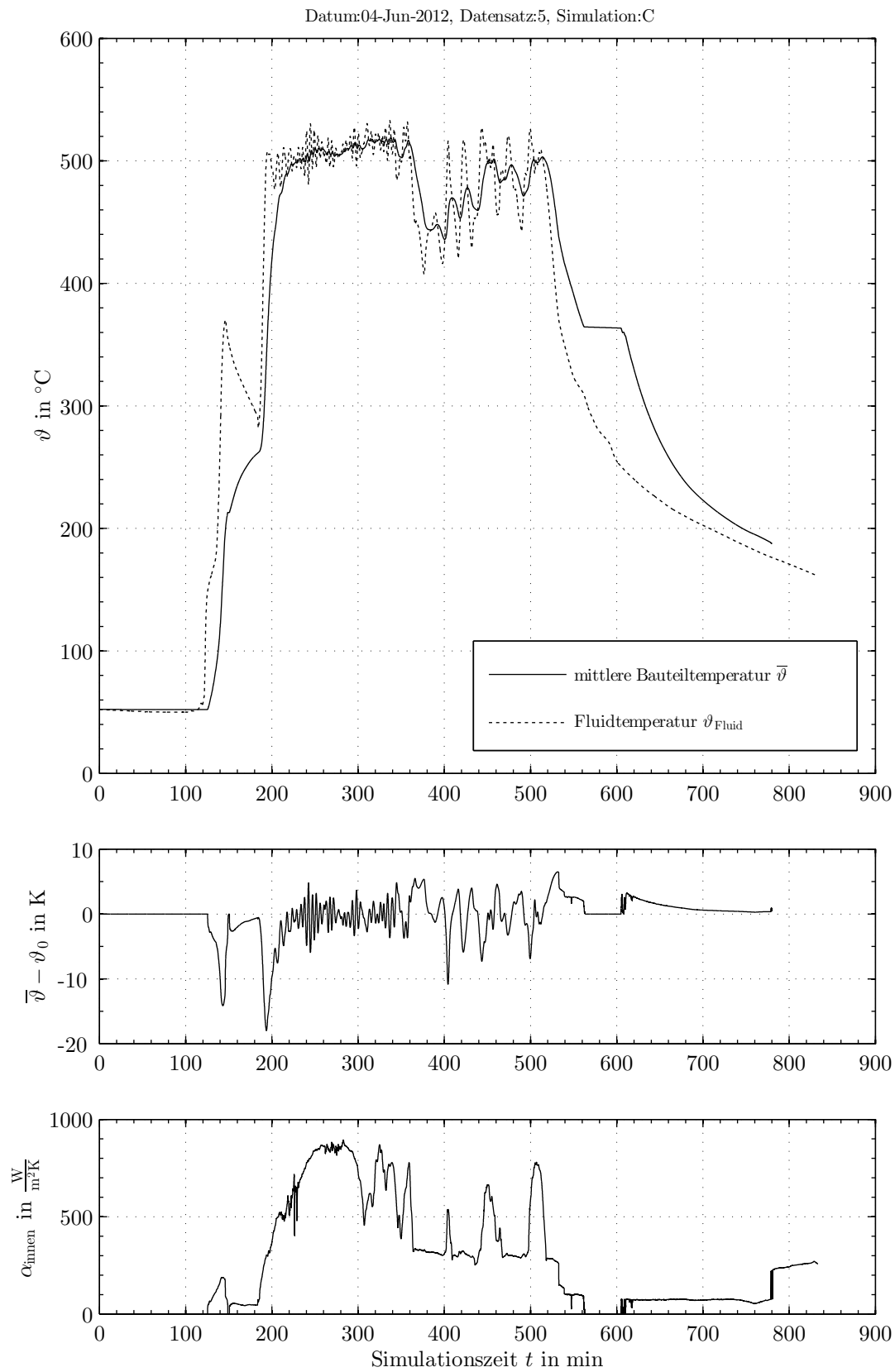


Bild 6-9: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (04.06.2012)

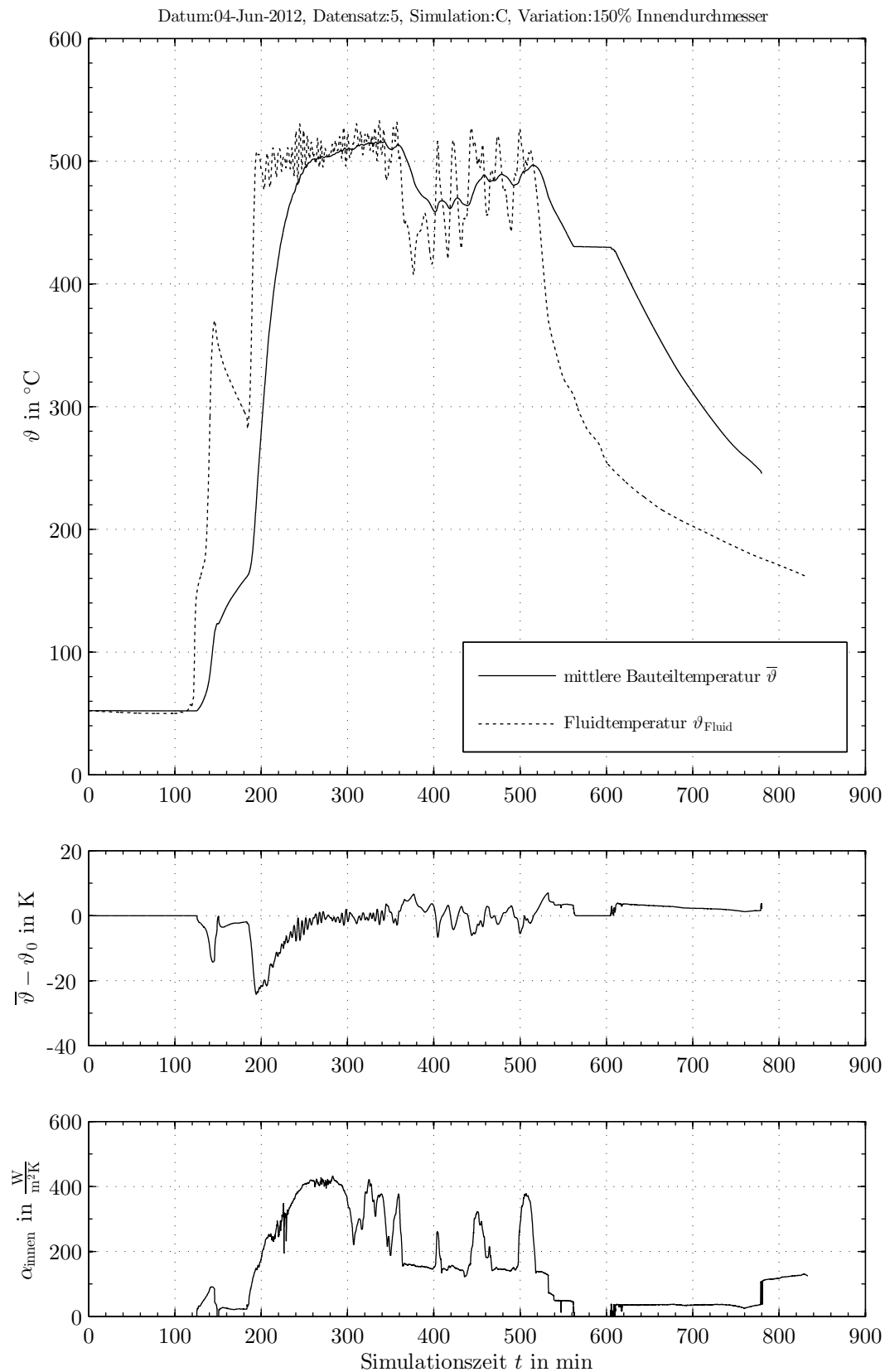


Bild 6-10: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1, mit 150 % Innendurchmesser (04.06.2012)

6.2.3 Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten

Im Anschluss an die Erkenntnisse aus dem oberen Abschnitt wird nun der Wärmeübergangskoeffizient verändert. Hierbei wird einerseits der zustandsabhängige Wert mit einem konstanten Faktor versehen, der dann variiert wird. Andererseits wird der Wärmeübergang über der Zeit als konstant angesetzt und variiert. Die Ergebnisse sind in Bild 6-11 zusammengetragen.

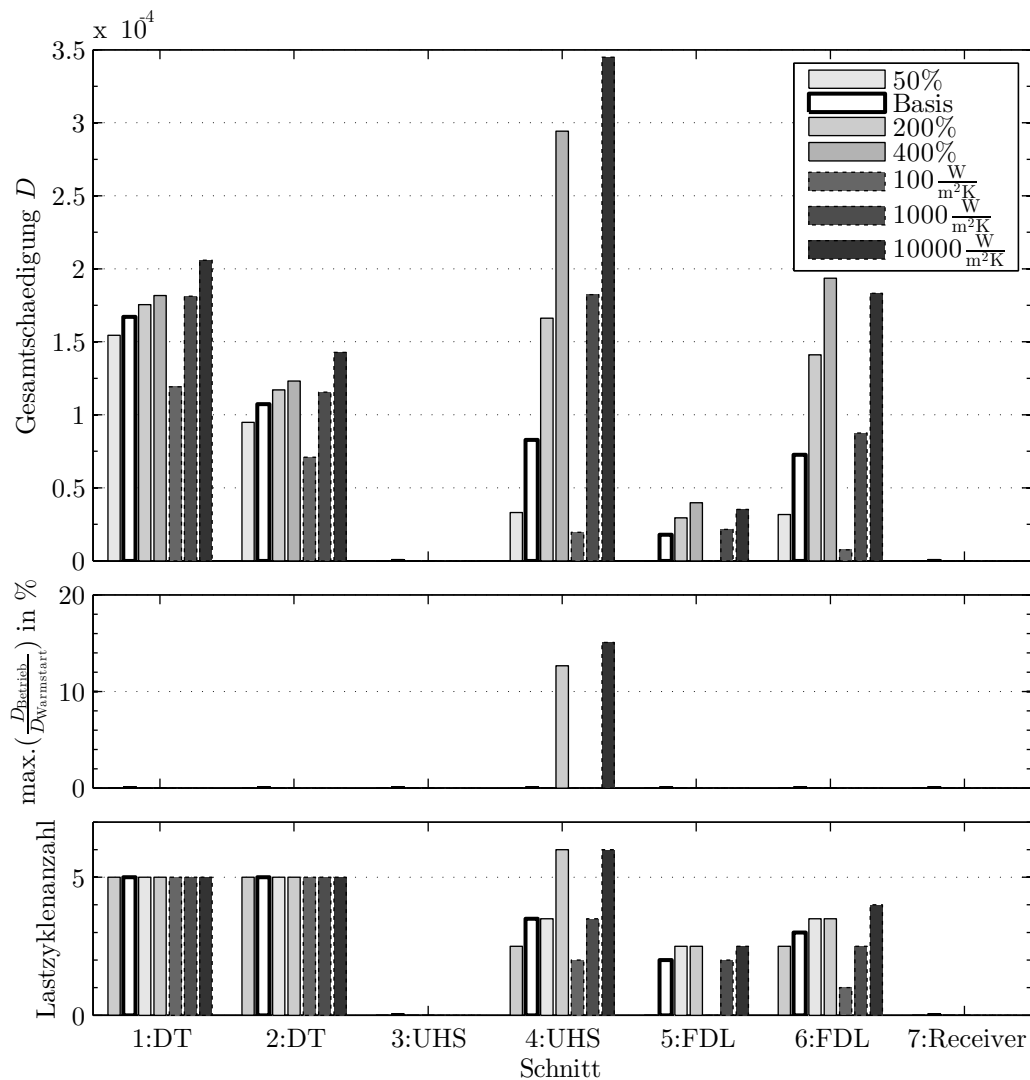


Bild 6-11: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des Wärmeübergangskoeffizienten α_{innen} zwischen 50 % und 400 % (Zustandsabhängig) und von 100 bis 10 000 W/m²/K (konstant über der Zeit) (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Wie bereits im vorherigen Abschnitt angedeutet steigt mit steigendem Wärmeübergang die Schädigung, da zum einen das Bauteil größere Temperaturspannungen auf-

weist und zum anderen beim Anfahren die maßgebende zyklische Temperatur steigt, die Festigkeit daher abnimmt. Für die Dampftrommel, bei der ohnehin hohe Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt werden, sind moderate Einflüsse auf Änderungen des Wärmeübergangs zu erkennen. Ein zusätzlicher Lastwechsel ist nicht zu beobachten. Dahingegen zeigt der Überhitzersammler (Schnitt 4) einen innerbetrieblichen schädigenden Lastzyklus beim vierfachen Wärmeübergang bzw. bei $10\,000\text{ W/m}^2/\text{K}$. Die rechnerische Schädigung des sechsten Lastzyklus liegt bei 13 % bis 15 % der Warmstartschädigung (an dem Tag des zusätzlichen Lastzyklus). Für den Überhitzersammler dürften Werte über $1\,000\text{ W/m}^2/\text{K}$ in der Praxis durchaus noch relevant sein. Daher soll näher betrachtet werden, wo genau die Schädigung auftritt.

Die Schädigung entsteht für die Daten vom 1. Juni 2012 (vgl. Bild 6-12 auf der folgenden Seite). Der Druck im Sammler sinkt etwa 400 Minuten nach Simulationsbeginn um 60 bar ab, steigt dann aber nicht unmittelbar danach wieder auf das ursprüngliche Niveau an. Dagegen nimmt die Dampftemperatur kurze Zeit nach dem Einbruch wieder die Nenntemperatur ein, was mit einem Anstieg von etwa 25 K/min verbunden ist (vgl. Anhang C.5, S. 135 ff.). Dies bedeutet, dass der niedrigere Systemdruck in Verbindung mit dem erneuten schnellen Erwärmen der Bauteilwand zu einem Spannungsminimum führt, das zusammen mit einem späteren Maximalwert den Lastzyklus bildet. Eine zusätzliche Schädigung von 15 % ist beachtlich und darf nicht vernachlässigt werden. Als Vergleich ist in Bild 6-13 das Spannungs- und Schädigungsdiagramm für den Fall mit $1\,000\text{ W/m}^2/\text{K}$ gezeigt.

Es wird deutlich, dass der in dieser Arbeit für den Anfahrvorgang unzureichend beschriebene Wärmeübergang bei diesen Bauteilen dazu beiträgt, dass die fünf Warmstartzyklen in Bild 6-1 auf Seite 88 nicht vollständig auftreten. Unter Betrachtung der Sensitivitätsrechnung kann davon ausgegangen werden, dass zumindest der dickwandige Teil des Überhitzersammlers bei jedem Warmstart geschädigt wird und dass unter ungünstigen Bedingungen auch eine Schädigung durch schwankende Betriebsparameter auftreten kann (vgl. Bild E-60, Bild E-61, S. 200 f. und Bild F-9, Bild F-10, S. 206 f.).

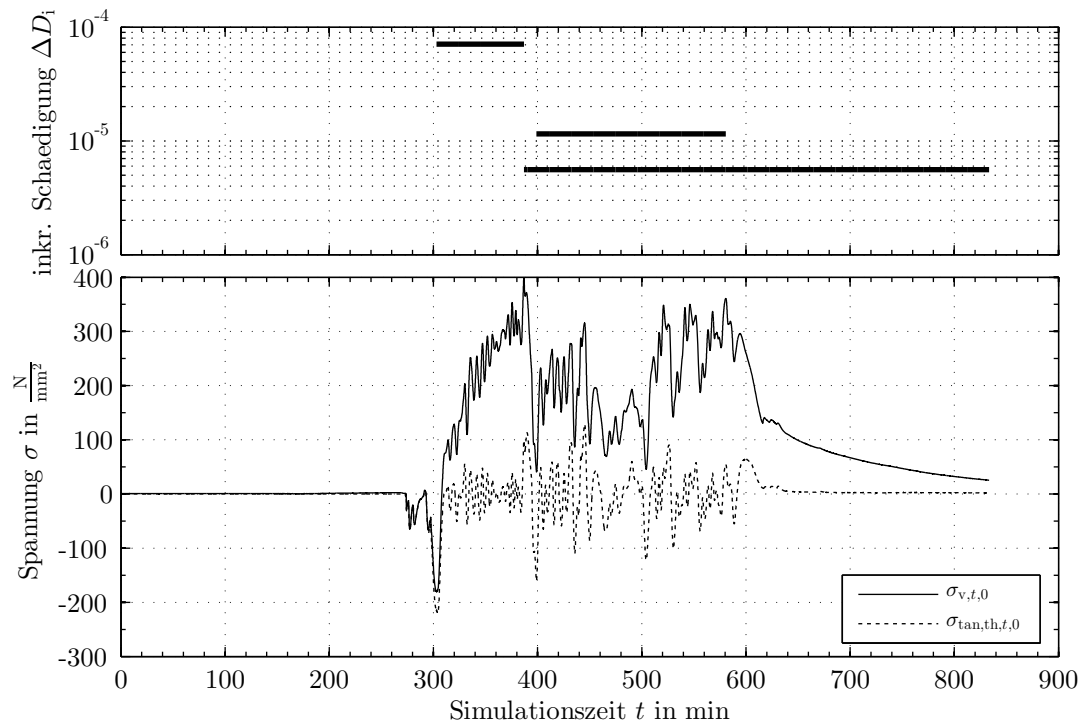


Bild 6-12: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten von 10 000 W/m²/K am 01.06.2012

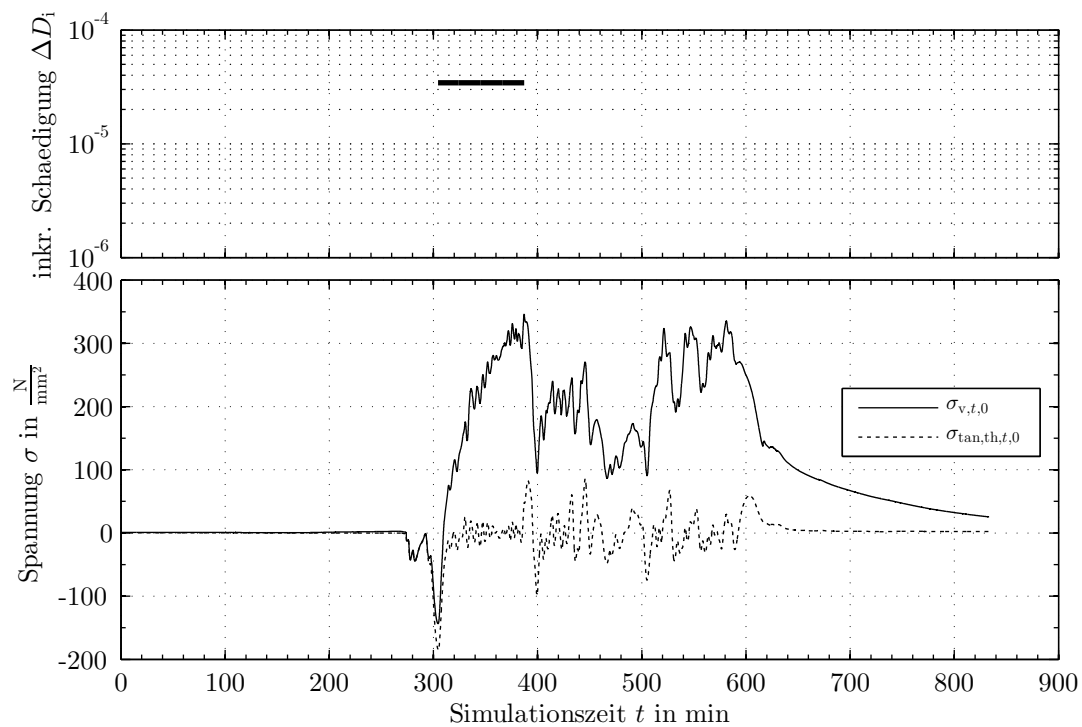


Bild 6-13: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten von 1 000 W/m²/K am 01.06.2012

6.2.4 Veränderung der Spannungskonzentrationsfaktoren

Abschnitt 3.3 ist ausführlich auf die Spannungskonzentrationsfaktoren eingegangen. Diese sollen berücksichtigen, in welchem Maß die Spannung im Verschneidungsbereich zweier Zylinder von der Membranspannung abweicht. Sie hängen im Wesentlichen vom Innendurchmesser des Abzweigs und vom Wandstärkenverhältnis ab. Die SKF unterliegen somit konstruktiven Gegebenheiten, die im Rahmen dieser Arbeit einen Unsicherheitsfaktor darstellen. Aus diesem Grund wird sowohl der SKF für den Innendruck α_m als auch der SKF für die Wandtemperaturdifferenz α_t variiert. Abgesehen von den Anfahr- und Abfahrvorgängen, konnte mit den gewählten SKF keine rechnerische Betriebsschädigung (während des Betriebs) ermittelt werden. Daher werden die Faktoren in Richtung höherer Spannungen variiert.

Spannungskonzentrationsfaktor für den Innendruck

Bild 6-14 zeigt die Gesamtschädigung und Gesamtlastzyklenanzahl für die Schnitte 1 bis 6, summiert über alle fünf Tage. Das Überhitzerrohr (Schnitt 7) ist bei dieser Sensitivitätsbetrachtung unberücksichtigt geblieben, da es prinzipiell keine Verschwächung durch Abzweige besitzt, sondern aus einem geraden Rohr besteht, welches definitionsgemäß keiner Spannungskonzentration unterliegt. Im unteren Bereich der Abbildung ist zu erkennen, dass bereits eine Steigerung des SKF um 20 % zu einem zusätzlichen schädigenden Lastzyklus bei der Dampftrommel führt. Der Überhitzersammler erfährt bei einer Steigerung um 40 % einen schädigenden Zyklus während des Betriebs. Gleiches gilt für die Frischdampfleitung.

Die Gesamtschädigung steigt überproportional mit dem SKF an. Dabei wird ein nicht unerheblicher Teil der Gesamtschädigung von den zusätzlichen Betriebslastzyklen veranschlagt. Diese zusätzlichen Schädigungen belaufen sich auf maximale Werte um 17 % der Warmstartschädigung. Auffällig ist, dass die Gesamtschädigung des Überhitzersammlers und der Frischdampfleitung im Gegensatz zu der Dampftrommel weniger stark zunimmt, der Anteil der Betriebsschädigung im Vergleich zur Dampftrommel jedoch größer ist. Der maximale Anteil der Betriebsschädigung verhält sich mit steigendem SKF fast gleichbleibend.

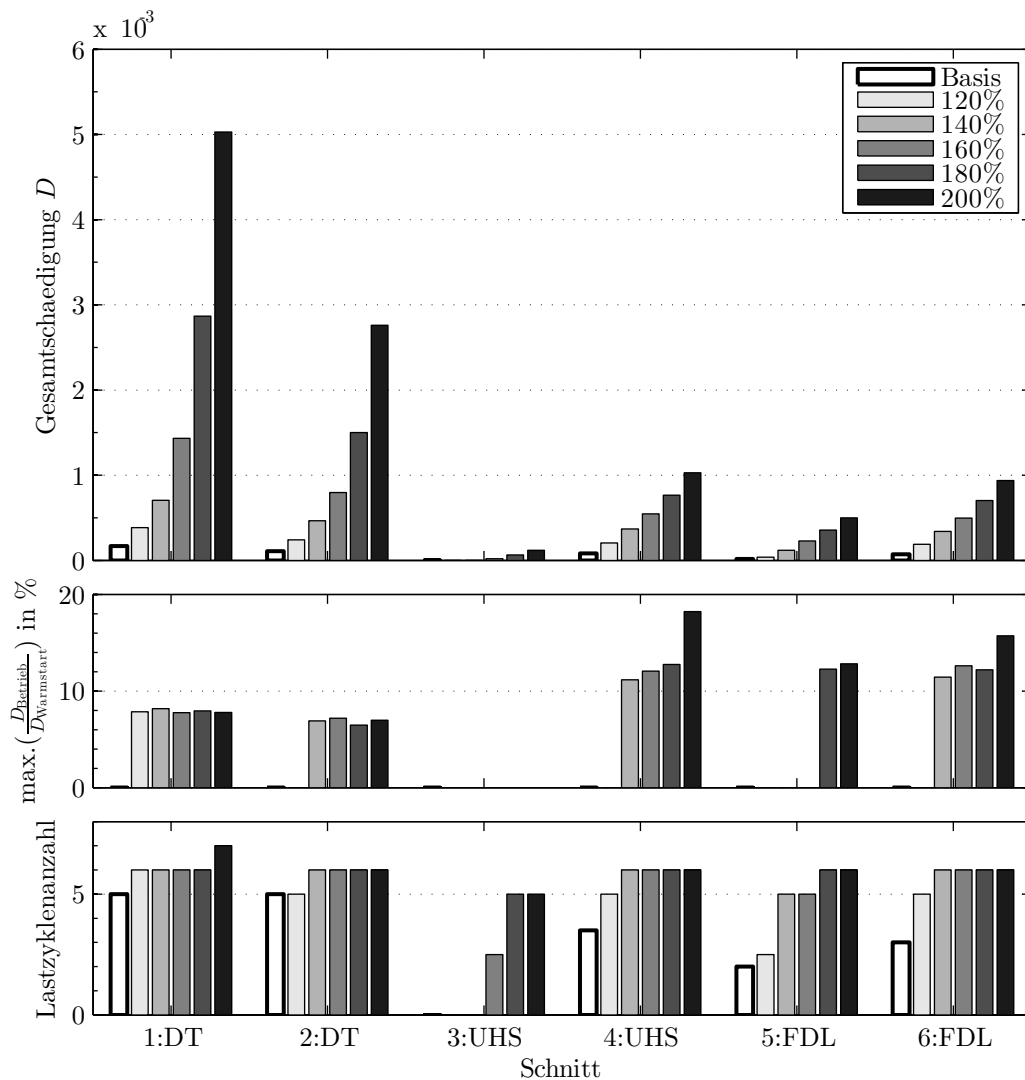


Bild 6-14: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des SKF für den Innendruck α_m zwischen 100 und 200 % (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Im Hinblick auf die SKF-Diagramme (vgl. Bild 3-5, S. 41 und Bild 3-6, S. 42) sei erwähnt, dass die Faktoren sehr breit variiert wurden. Eine Steigerung um 20 % scheint möglich, wenngleich hierfür bereits wesentlich kleinere Wandstärkenverhältnisse gewählt werden müssten. Der zusätzliche Zyklus tritt am 1. Juni 2012 auf. Der deutliche Einbruch des Betriebsdruckes etwa 500 Minuten nach Simulationsbeginn bildet hier den Zyklus gemeinsam mit dem späteren Maximum (vgl. Bild F-11, S. 207). Bei einer Steigerung um 60 % und mehr müsste der SKF für die Bauteiltemperaturdifferenz geringer sein, was wiederum der Spannungssteigerung entgegenwirkt. Eine Verdopplung des SKF scheint praktisch ausgeschlossen. Daher wird auf diese Ergebnisse nicht weiter eingegangen.

Spannungskonzentrationsfaktor für die Bauteiltemperaturdifferenz

Wird der Spannungskonzentrationsfaktor für die Wandtemperaturdifferenz α_t verändert, so ergibt sich das Bild 6-15. Darin ist zu erkennen, dass die Gesamtschädigung stetig zunimmt. Außer bei Verdopplung des SKF kommt es aber nicht zu einem schädigenden Lastzyklus während des Betriebs. Offensichtlich reichen die Temperaturgradienten während des Betriebs nicht aus, um eine Schädigung hervorzurufen. Für die anderen Schnitte gilt dies gleichermaßen, obwohl mit steigendem SKF die Warmstarts zunehmend schädigend eingehen. Im Gegensatz zur Variationsrechnung des SKF für die Druckspannungen zeigt sich hier eine größere Sensitivität bei den Schnitten, die den Gradienten des überhitzten Dampfes ausgesetzt sind.

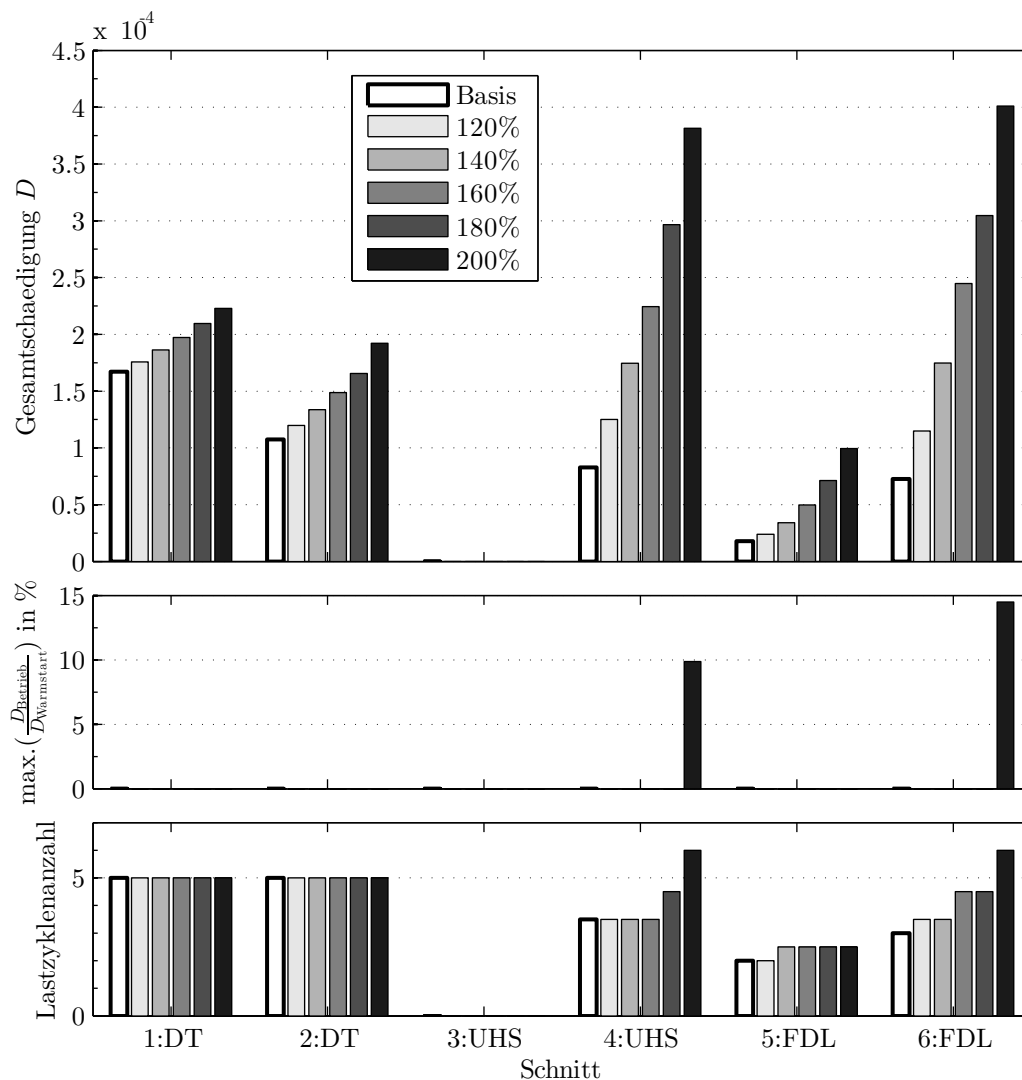


Bild 6-15: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des SKF für die Wandtemperaturdifferenz α_t zwischen 100 und 200 % (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

Auch dieser SKF ist in einem breiten Band variiert worden. Für die Praxis sollten Steigerungen über 20 % nicht relevant sein, wobei man bereits hier von grundsätzlich anderen Durchmesserhältnissen ausgehen muss. Dies hätte wiederum zur Folge, dass der SKF für die Druckspannungen geringer ausfällt.

6.2.5 Phasenversatz zwischen der Druck- und Temperaturzeitreihe

Die in Abschnitt 2.4.3 (S. 23 ff.) erwähnte Veränderung des transienten Verhaltens der Dampfparameter bei unterschiedlichen Anlagengrößen wurde bei der Skalierung nicht berücksichtigt. Die damit verbundenen Unsicherheiten sollen anhand einer Sensitivitätsbetrachtung zumindest annähernd abgeschätzt werden. Hierfür wird die Zeitreihe der skalierten Prozesstemperatur gegenüber der Zeitreihe für den Druck (und der für den Massenstrom) zeitlich verschoben. Die Werte selbst bleiben unverändert. Damit kann zwar ein Phasenversatz vorgetäuscht werden, aber eine reale Trägheit, die diesen Phasenversatz verursachen würde, hätte auch Einfluss auf die Höhe der Werte. Von Resonanzen abgesehen, nehmen die Amplituden im Allgemeinen mit der Trägheit ab. Da die Amplituden hier konstant bleiben, stellt auch diese Betrachtung einen konservativen Ansatz dar. Für die weiteren Untersuchung von Interesse ist das Verhalten bei hohen Prozessdrücken, bei dem eine Absenkung der Temperatur zu einer weiteren Steigerung der Bauteilzugspannungen an der Innenfaser führt. Anfangs wurde erläutert, dass die Temperatur im Verdampfer dem Druck folgt. Hier sollte sich in der Praxis das Problem der dem Prozessdruck vorauseilenden Temperaturabsenkung nicht ergeben. Betrachtet man den Überhitzer losgelöst vom Verdampfer, ist die Temperatur dort unabhängig vom Druck. Da sich die Temperaturschwankungen dort aber in erster Linie aufgrund von Schwankungen der Bestrahlungsstärke ergeben und diese ebenso auf das Verdampferfeld wirken, herrscht in der Praxis ein Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung sind in Bild 6-16 dargestellt. Darin sind keine wesentlichen Einflüsse zu erkennen - weder auf die Anzahl der schädigenden Zyklen noch auf die rechnerische Gesamtschädigung.

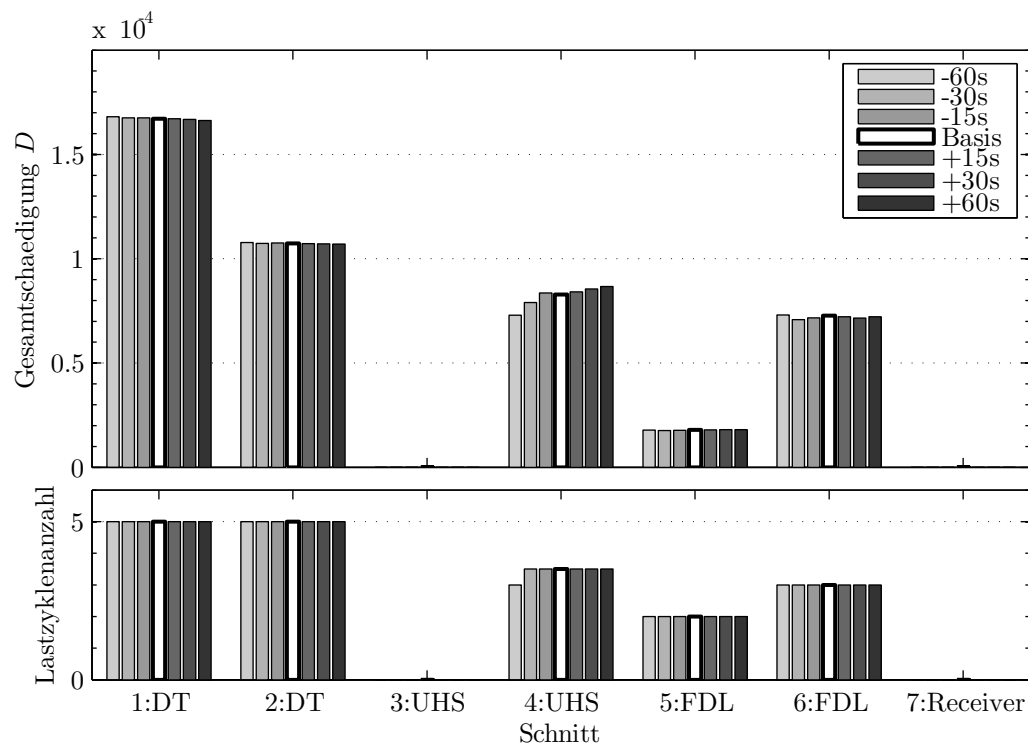


Bild 6-16: Gesamtschädigung und -lastzyklenanzahl für jeden Schnitt summiert über die fünf Referenztage mit Variation des Zeitversatzes zwischen der Druck- und Temperaturzeitreihe von -60s bis +60s (positiver Zeitversatz: Druck eilt der Temperatur voraus) (Zahlendarstellung mit Dezimalpunkt)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dieser Arbeit gilt es herauszufinden, ob und inwieweit die im Betrieb auftretenden Schwankungen eines solarthermischen Kraftwerks mit Direktverdampfung Auswirkungen auf die Lebensdauer der Bauteile haben. Um der Fragestellung zu begegnen, wurde mit Hilfe der Finiten-Differenzen-Methode das eindimensionale transiente Temperaturverhalten eines zylindrischen Bauteils beschrieben und unter Anwendung grundlegender Prinzipien Messwerte eines bestehenden Kraftwerkes auf die zu untersuchende Anlagengröße skaliert. Anhand der verfahrenstechnischen Daten und unter Berücksichtigung der wesentlichen auslegungsrelevanten Normen sind die vernünftigerweise anzunehmenden Abmessungen der Bauteile ermittelt worden, die einer potentiellen Gefahr durch hohe Dehnungslastzyklen unterliegen. Das Bauteilverhalten, die Bauteildimensionen und die Randbedingungen wurden damit beschrieben. Um daraus eine mögliche Schädigung infolge hoher wiederkehrender Dehnungen zu ermitteln ist auf internationale Standards aus dem konventionellen Kraftwerksbau zurückgegriffen worden, die einen konservativen Ansatz verfolgen.

Dabei sind in erster Instanz keine schädigenden Lastzyklen identifiziert worden, die während des Betriebs auftauchen. Der Einfluss der Warmstartbelastung wurde dabei jedoch sehr deutlich herausgearbeitet und trat in fast allen untersuchten Schnitten hervor. Die errechneten Schädigungswerte liegen im Bereich der bei der Auslegung der Bauteile zu berücksichtigenden Größenordnung. Dies stellt jedoch keine Erkenntnis dieser Arbeit dar, sondern rückt die Ergebnisse mit allen zugrunde liegenden Annahmen in den Bereich des Plausiblen.

Für die besonders dickwandigen Bauteile, wie die Dampftrommel, gilt, dass die thermische Belastung zu einer deutlichen und regelmäßigen Schädigung durch den Warmstartzyklus beiträgt. Die während des Betriebs auftretenden Dampftemperaturschwankungen im Verdampfer reichen jedoch nicht aus, um zusätzliche schädigende Zyklen zu erzeugen. Bis auf den SKF für den Bauteilinnendruck zeigt sich die Dampftrommel in den Variationsrechnungen als sehr genügsam. Selbst eine Vergrößerung des Innendurchmessers auf 2,7 m zeigte keine Sensitivität auf innerbetriebliche schädigende Lastzyklen. Eine solide Auslegung im Sinne der

geltenden Regularien sollte auch bei solarthermischen Anlagen mit Direktverdampfung zu einer langlebigen Komponente führen. Ob die Notwendigkeit eines Zwangsdurchlaufkessels (once-through) besteht, bei dem die Kesseltrommel durch Zyklonabscheider kleineren Durchmessers und damit dünneren Wandstärken ersetzt würde, ist kritisch zu prüfen. Die in dieser Arbeit betrachteten Anfahrtransienten von etwa 8 K/min sollten im Hinblick auf die Schädigung reduziert werden. Jedoch wird die Integration von Speichern, die ganze Nächte überbrücken können, zwangsläufig zu einer Reduktion der Warmstarthäufigkeit führen. Die Restlebensdauer des Bauteils könnte dann in gesteigertem Maße durch steilere Transienten ausgenutzt werden.

Das strahlungsbeheizte Receiverrohr blieb in allen Rechnungen unauffällig und es wurde selbst unter voller Bestrahlungsstärke, wechselnden Dampftemperaturen und sehr hohen Wärmeübergangskoeffizienten keine rechnerische Schädigung festgestellt. Dies liegt vor allem daran, dass keine Abzweige zu Spannungskonzentrationen beitragen und daran, dass es das Bauteil mit der geringsten betrachteten Wandstärke ist. Der wesentliche Schädigungsmechanismus wird hier das Kriechen infolge hoher oder zu hoher Temperaturen sein. Diese können im Betrieb mit relativ einfachen Mitteln begrenzt werden, ohne den Betrieb der Anlage wesentlich zu beeinflussen. Dies setzt voraus, dass die Materialtemperaturen gemessen oder zumindest rechnerisch ermittelt werden.

Für den Überhitzersammler und die Frischdampfleitung ist keine eindeutig Aussage zu treffen. Einerseits liegt die rechnerische Schädigung der Warmstartzyklen unterhalb der Werte für die Dampftrommel, andererseits konnte gezeigt werden, dass der Sammler im Bereich der großen Wandstärken empfindlich auf höhere Wärmeübergangskoeffizienten und Spannungskonzentrationsfaktoren reagiert und dann auch während des Betriebs geschädigt werden kann. Die Schwankungen der Prozessparameter reichen unter ungünstigen Bedingungen daher aus, um einen lebensdauerverkürzenden Einfluss auszuüben. Dabei sind es nicht die regelmäßigen kleinen Schwankungen, sondern diejenigen Schwankungen, bei denen der Druck um etwa 30 % und mehr absinkt. Ohne diese Druckschwankungen rufen die Temperaturschwankungen keine rechnerische Bauteilschädigung hervor, da die Zugspannung dominiert. Eine Steigerung der maximalen Zugspannung infolge eines Abkühlungs-

prozesses unter hohem Bauteilinnendruck konnte nicht festgestellt werden, da bei Schwankungen von außen zuerst der Druck abnimmt und dann die Temperatur folgt. Eine Dampftemperaturregelung durch Einspritzkühler könnte die Steigerungsgeschwindigkeit der Dampftemperatur nach einem Druckabfall begrenzen und so einer Schädigung entgegenwirken. Gleiches wäre auch mit einer Defokussierung zu erreichen. Hier sollte geprüft werden, welches der beiden Konzepte dieser Aufgabe regelungstechnisch am besten gerecht wird.

In Tabelle 7-1 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen zusammengefasst. Darin ist die Reaktion auf die Vergrößerung des Variationsparameters zu sehen.

	Wandstärke	Innen-durchmesser	Wärme-übergang	Druck-SKF	Temp.-SKF	Phasen-versatz
Dampftrommel (Schnitt 1 und 2)	+2	−1	−1	−2	−1	0
Überhitzersammler (Schnitt 3 und 4)	+1	0/+1	−2	−1	−2	0
Frischdampfleitung (Schnitt 5 und 6)	0	0	−2	−1	−2	0
Receiverrohr (Schnitt 7)	0	0	0	/	/	0

Tabelle 7-1: Übersicht über die Sensitivität auf Vergrößerung des Variationsparameters (positive Zahle bedeuten eine geringere Schädigung)

Zu bemerken bleibt, dass diese Arbeit nicht alle Aspekte berücksichtigt, die bei der Auslegung von Komponenten zu beachten sind. In der Praxis hat ein Hersteller eine Gewährleistung für seine Komponenten abzugeben und muss nicht nur die direkten wirtschaftlichen Folgen eines Schadens fürchten, sondern auch seinen Ruf wahren. Daher werden die zulässigen Transienten in der Praxis schärferen Bewertungskriterien unterliegen als es hier der Fall war.

Als große kritische Komponente bleibt die Dampfturbine zu erwähnen, deren Wandstärken und Formen eben nicht nur durch den Innendruck bestimmt sind, sondern

maßgeblich durch die maschinendynamischen (und auch statischen) Belastungen und die Funktionsweise. Die Schwierigkeit bei der Bestimmung der Spannungskonzentrationen ist einer der Gründe, warum diese Komponente in dieser Arbeit unberücksichtigt blieb. Eine seriöse Betrachtung kann nach Ansicht des Autors nur bei den Herstellern oder mindestens in enger Zusammenarbeit mit ihnen erfolgen. Dies stellt einen wichtigen Schritt bei der Qualifizierung der Dampfturbine für diesen Anlagentyp dar und sollte insbesondere in der jetzigen Zeit, bei schwacher Nachfrage nach solarthermischen Anlagen, gegangen werden.

Literaturverzeichnis

- Annaratone, Donatello. 2008.** *Steam Generators*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2008.
- Ariduru, Secil. 2004.** Fatigue Life Calculation by Rainflow Cycle Counting Method. s.l. : Middle East Technical University, 2004.
- Bronstein, I.N., et al. 2001.** *Taschenbuch der Mathematik*. 5. Auflage. Thun und Frankfurt am Main : Verlag Harri Deutsch, 2001.
- Bürgel, Ralf. 2006.** *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*. 3. Aufl. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2006.
- Cerbe, Günter und Wilhelms, Gernot. 2008.** *Technische Thermodynamik*. 15. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2008.
- Coleman, Matthew P. 2005.** *An Introduction to Partial Differential Equations with MATLAB*. Boca Raton, London, New York, Washington D.C. : Chapman&Hall/CRC, 2005.
- Dietzel, Fritz. 1980.** *Dampfturbinen*. 3. Aufl. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 1980.
- DIN EN 10028-2. 2009.** Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen - Teil 2: Unlegierte und legierte Stähle mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen. 2009.
- DIN EN 10216-2. 2007.** Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchung - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Rohre aus unlegierten und legierten stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen. 2007.
- DIN EN 12952-2. 2011.** Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 2: Werkstoffe für drucktragende Kesselteile und Zubehör. 2011.
- DIN EN 12952-3. 2001.** Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 3: Konstruktion und Berechnung für drucktragende Kesselteile. 2001.
- DIN EN 12952-4. 2011.** Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 4: Betriebsbegleitende Berechnung der Lebensdauererwartung. 2011.
- Doležal, Richard. 2001.** *Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke*. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 2001.
- Eck, Markus und Steinmann, W.-D. 2005.** *Modelling and Design of Direct Solar Steam Generating Collector Fields*. s.l. : Journal of Solar Engineering, 2005.

- Eck, Markus und Zarza, Eduardo. 2002.** *Assessment of Operation Modes for Direct Solar Steam Generation on Parabolic Troughs*. Zürich, Schweiz : 11th SolarPACES, 2002.
- Effenberger, Helmut. 2000.** *Dampferzeugung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2000.
- Feldhoff, Fabian. 2013.** Betrieb von Parabolrinnen- und Fresnelkraftwerken mit Direktverdampfung. Stuttgart : DLR, 2013.
- Feldhoff, Fabian, et al. 2013.** [www.dlr.de](http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/soko/soko2013/Feldhoff_Soko2013.pdf). [Online] 12. Juni 2013. [Zitat vom: 10. März 2014.]
http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/soko/soko2013/Feldhoff_Soko2013.pdf.
- Feldhoff, Jan Fabian, et al. 2011.** Comparative system analysis of direct steam generation and synthetic oil parabolic trough power plants with integrates thermal storage. *Solar Energy*. Volume 86, 2011, Issue 1.
- Grigull, Ulrich und Sandner, Heinrich. 1990.** *Wärmeleitung*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong : Springer-Verlag, 1990.
- Gülich, Johann Friedrich. 2004.** *Kreiselpumpen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 2004.
- Hirsch, Tobias, et al. 2013.** *Advancements in the field of direct steam generation in linear solar concentrators - a review*. Stuttgart : Taylor & Francis, 2013.
- Holmgren, Magnus. 2007.** MATLAB Central. [Online] 01. Aug. 2007. [Zitat vom: 12. Feb. 2014.] <http://www.mathworks.de/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam-thermodynamic-properties-of-water-and-steam>.
- Krüger, Dirk, et al. 2012.** *Experiences with Direct Steam Generation at Kanchanaburi Solar Thermal Power Plant*. Marrakesch, Marokko : SolarPACES, 2012.
- Krüger, Dirk, et al. 2010.** *Kanchanaburi Solar Thermal Power Plant with Direct Steam generation - Layout*. Perpignan, Frankreich : 16th SolarPACES Conference, 2010.
- Leithner, R., et al. 1990.** Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung der Temperaturdifferenz in dickwandigen Bauteilen für die lebensdauerberechnung. *VGB Power Tech*. Heft 6, 1990, 70.
- Matek, Wilhelm, et al. 2000.** *Roloff/Matek Maschinenelemente*. 14. Aufl. Braunschweig Wiesbaden : Vieweg & Sohn, 2000.

- Menny, Klaus. 2011.** *Strömungsmaschinen*. 5. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- Pinchover, Yehuda und Rubinstein, Jacob. 2005.** *An Introduction to Partial Differential Equations*. Cambridge : Cambridge University Press, 2005.
- Quaschnig, Volker. 2013.** *Regenerative Energiesysteme*. 8. Auflage. München : Hanser Verlag, 2013.
- Seitz, Markus. 2012.** Thermodynamische Simulation und Optimierung von Betriebszyklen bei solarthermischen Kraftwerken mit Flüssigsalzen als Wärmeträgermedium. s.l. : Hochschule Augsburg, 2012.
- Strauß, Karl. 2006.** *Kraftwerkstechnik*. 5. Auflage. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 2006.
- Taler, J., et al. 2002.** Monitoring of Thermal stresses in Pressure Components of Large Steam Boilers. *VGB PowerTech*. Heft 1, 2002.
- Traupel, Walter. 2001.** *Thermische Turbomaschinen*. 4. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2001. Bd. 2.
- TU Berlin, Institut für Mathematik. 2011.** Finite Differenzen Methode. [Online] 28. November 2011. [Zitat vom: 23. Januar 2014.] <http://www3.math.tu-berlin.de/ppm/skripte/fdm1.0.pdf>.
- VdTÜV-Werkstoffblatt 511/2. 09.2011.** Warmfester Stahl X10CrMoVNb9-1. 09.2011.
- VGB-R 105 M. 1990.** Das thermische Verhalten von Dampfturbinen. 1990. 2. Ausg.
- VGB-R 512 M. 2003.** Guideline for the Inspection and Evaluation of In-Service Rotors and Casings of Steam and Gas Turbine Generator Sets. 2003. 2. Ausg.

Anhang A Gemessene Prozessdaten

A.1 Gemessen am 01. Mai 2012

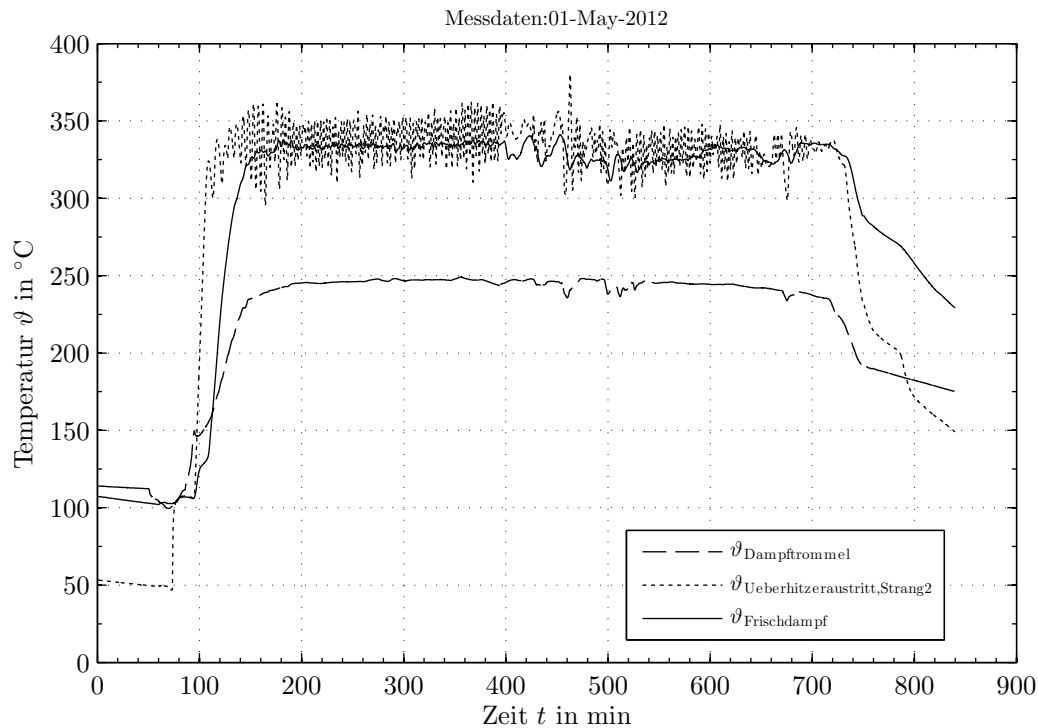


Bild A-1: Temperaturmessungen vom 01.05.2012

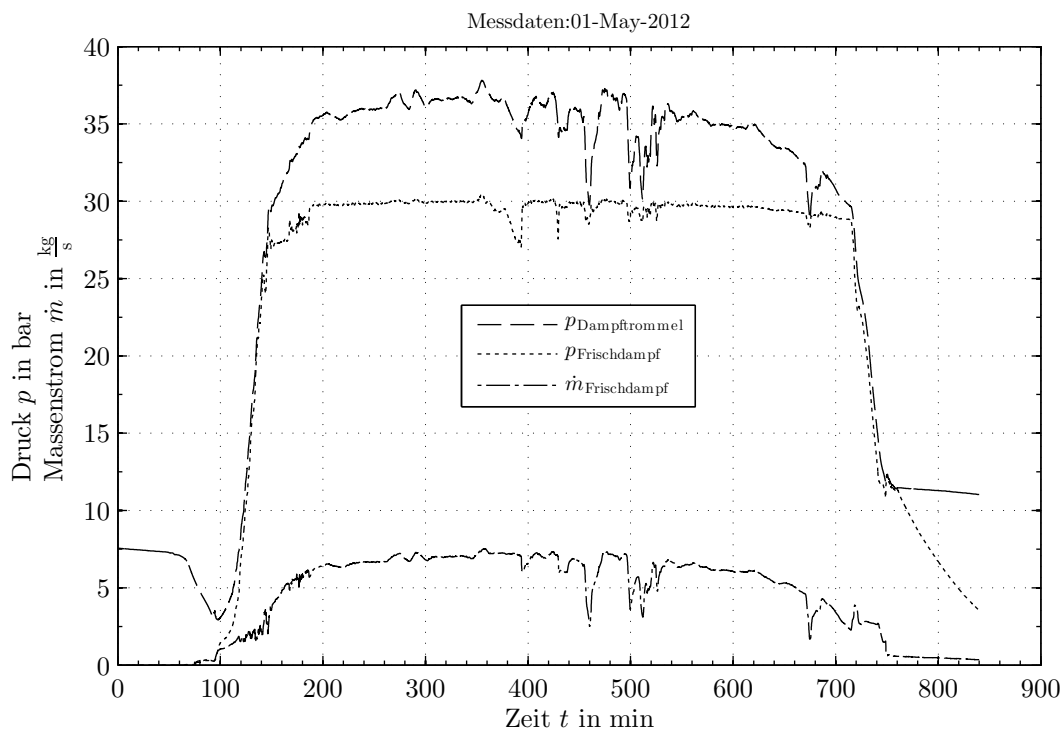
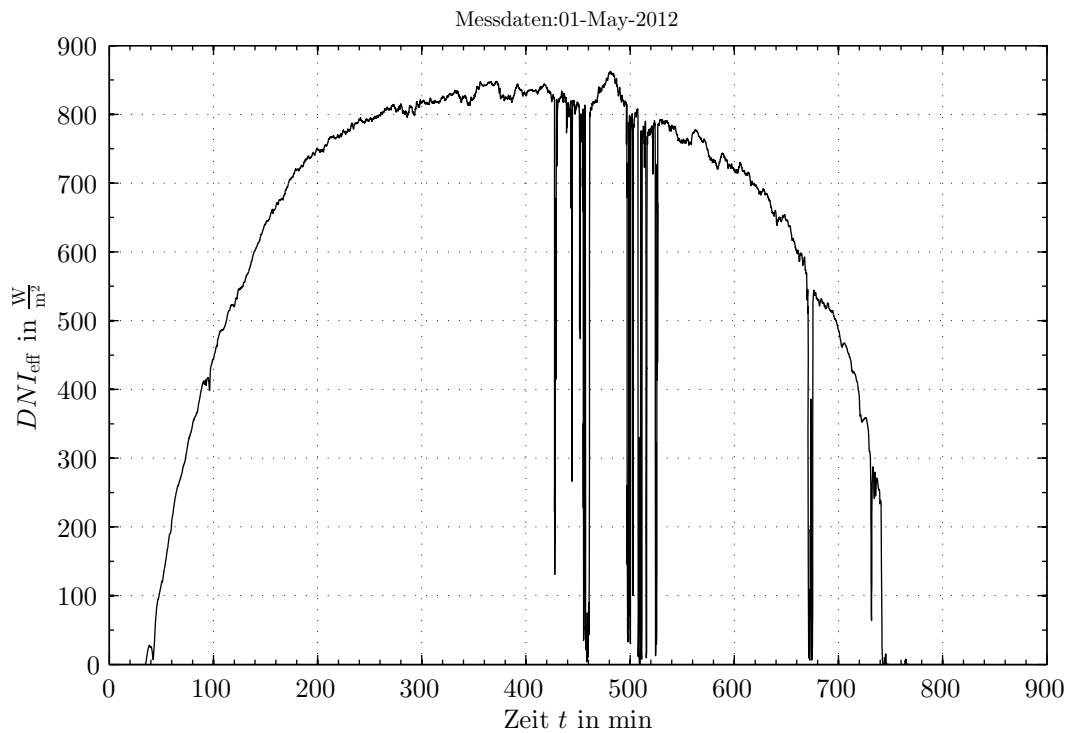
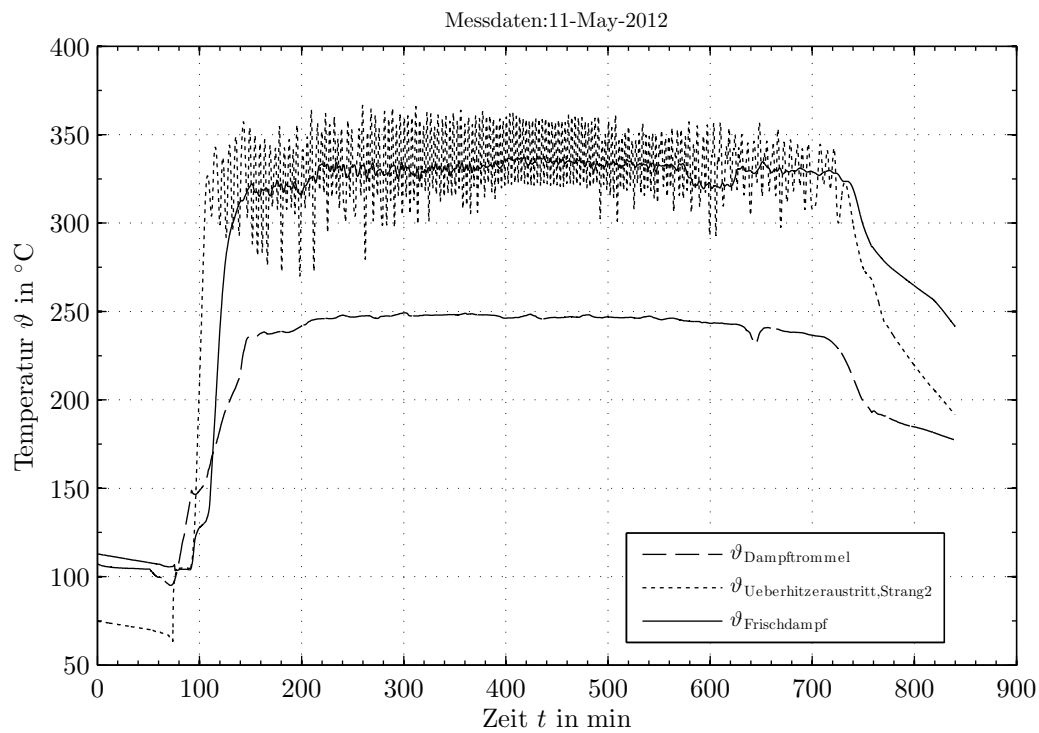
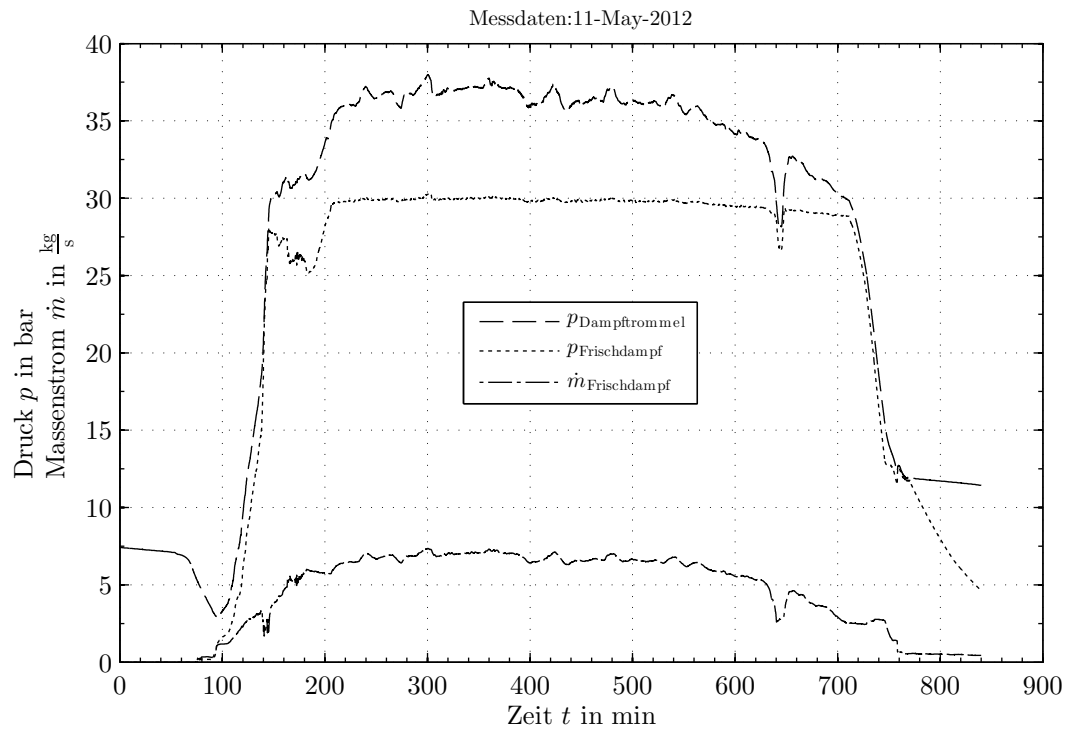
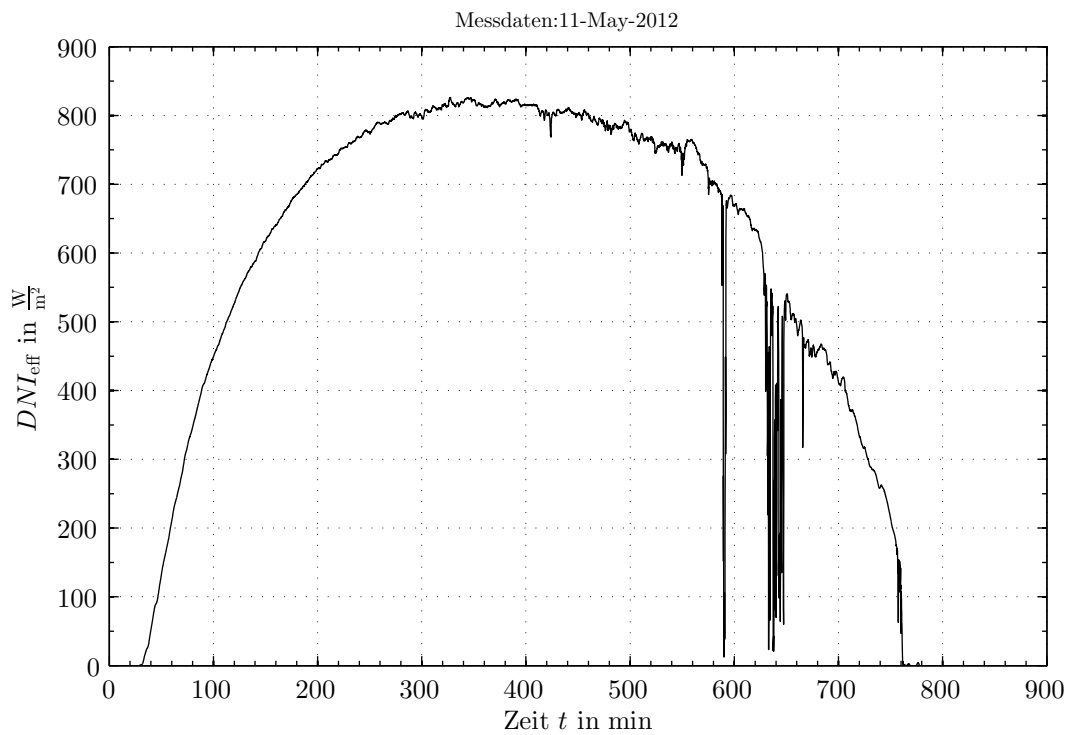


Bild A-2: Druck- und Massenstrommessungen vom 01.05.2012

**Bild A-3:** DNI_{eff} vom 01.05.2012

A.2 Gemessen am 11. Mai 2012

**Bild A-4:** Temperaturmessungen vom 11.05.2012

**Bild A-5:** Druck- und Massenströmmessungen vom 11.05.2012**Bild A-6:** DNI_{eff} vom 11.05.2012

A.3 Gemessen am 21. Mai 2012

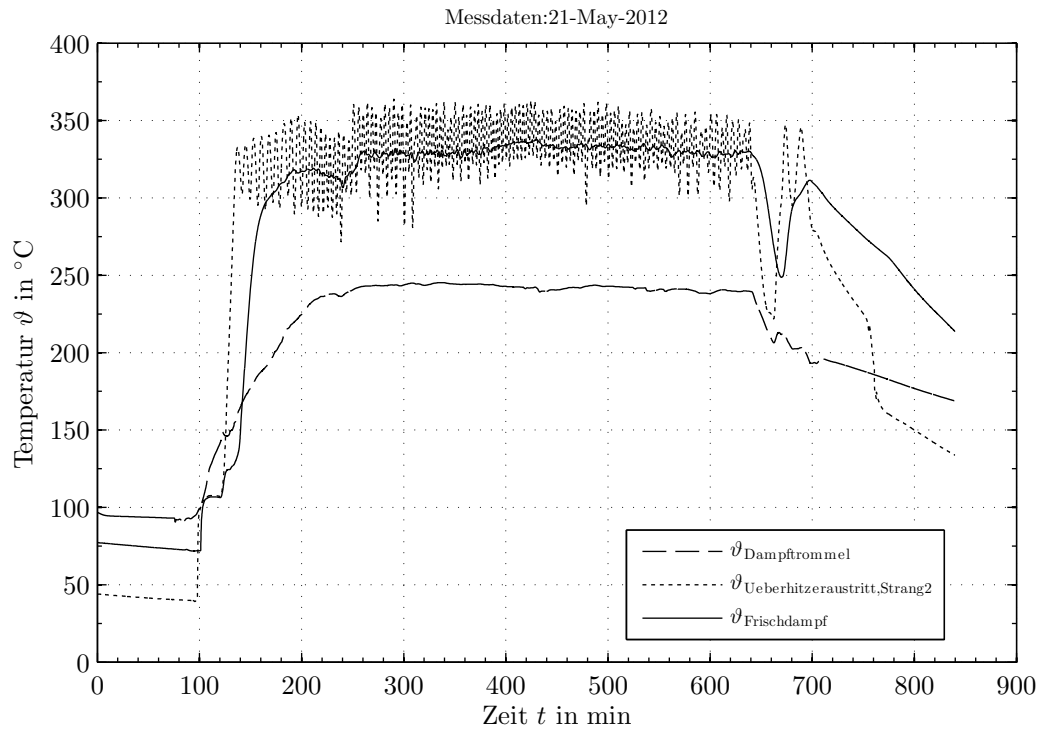


Bild A-7: Temperaturmessungen vom 21.05.2012

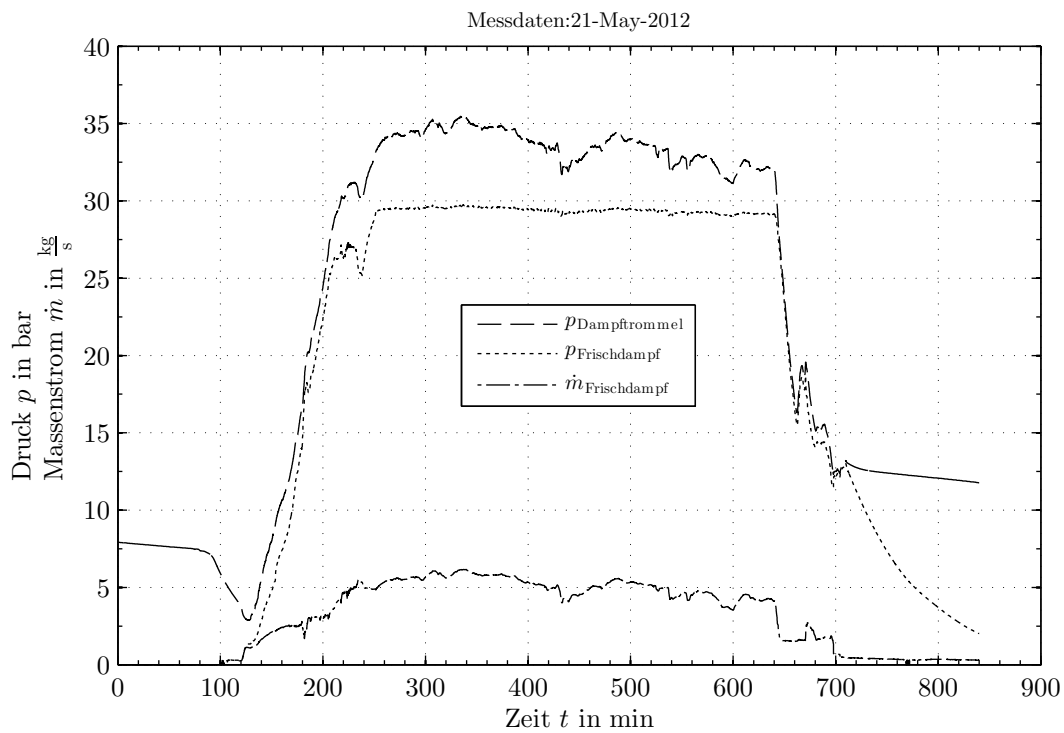
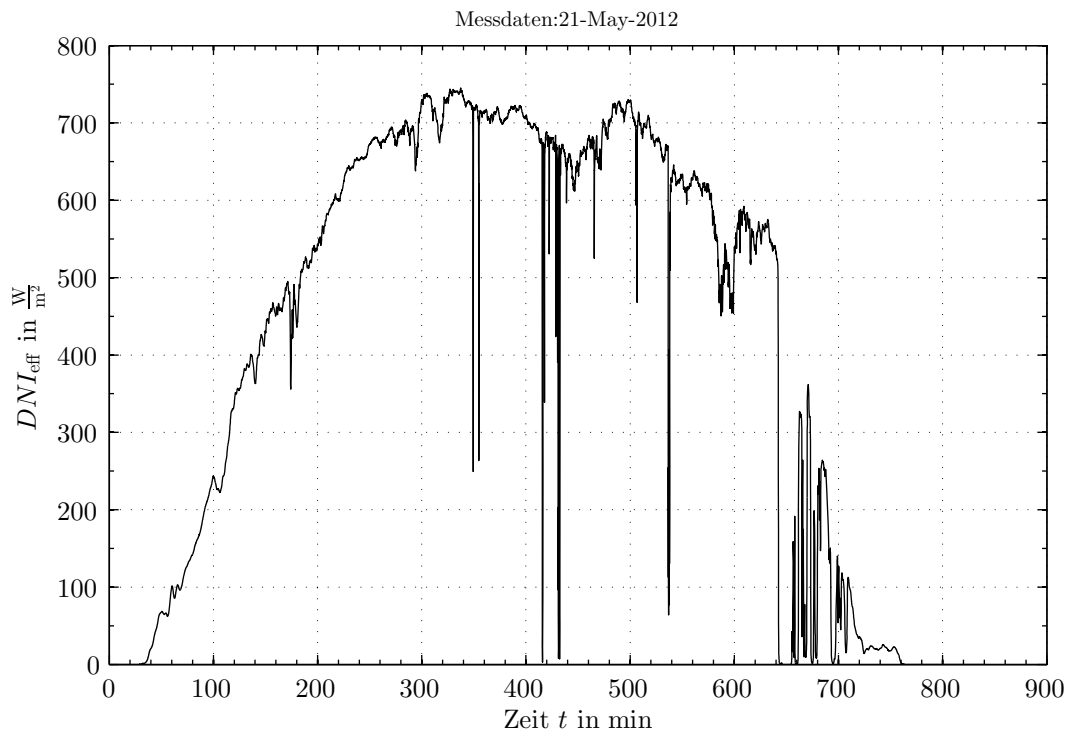
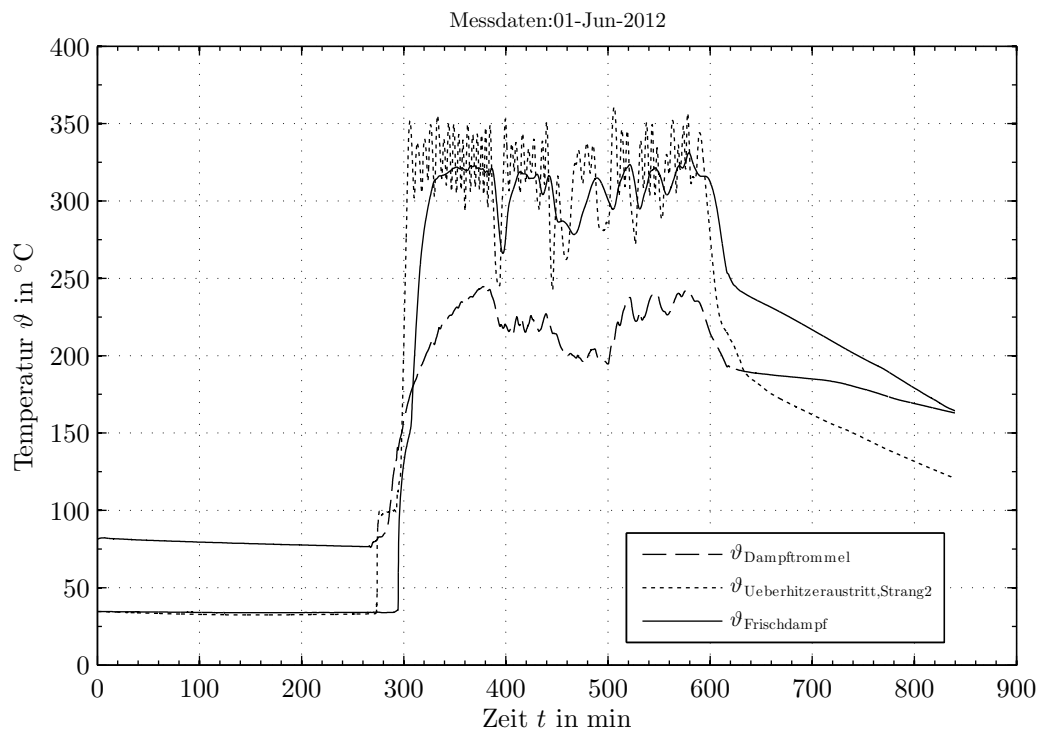
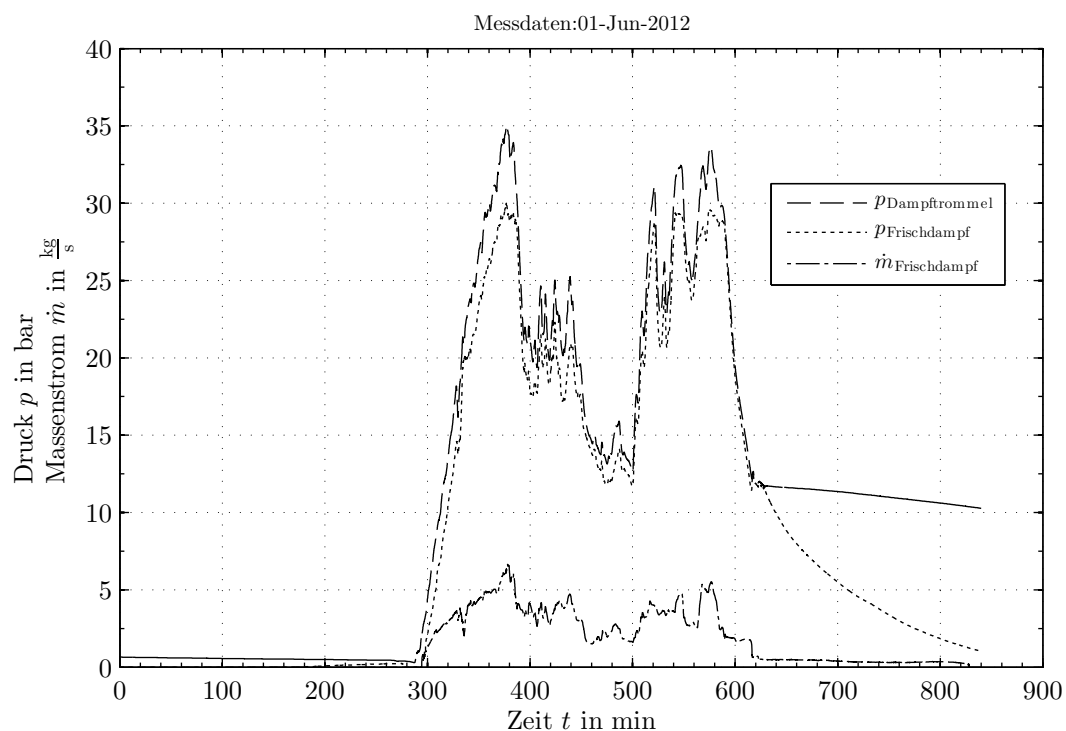
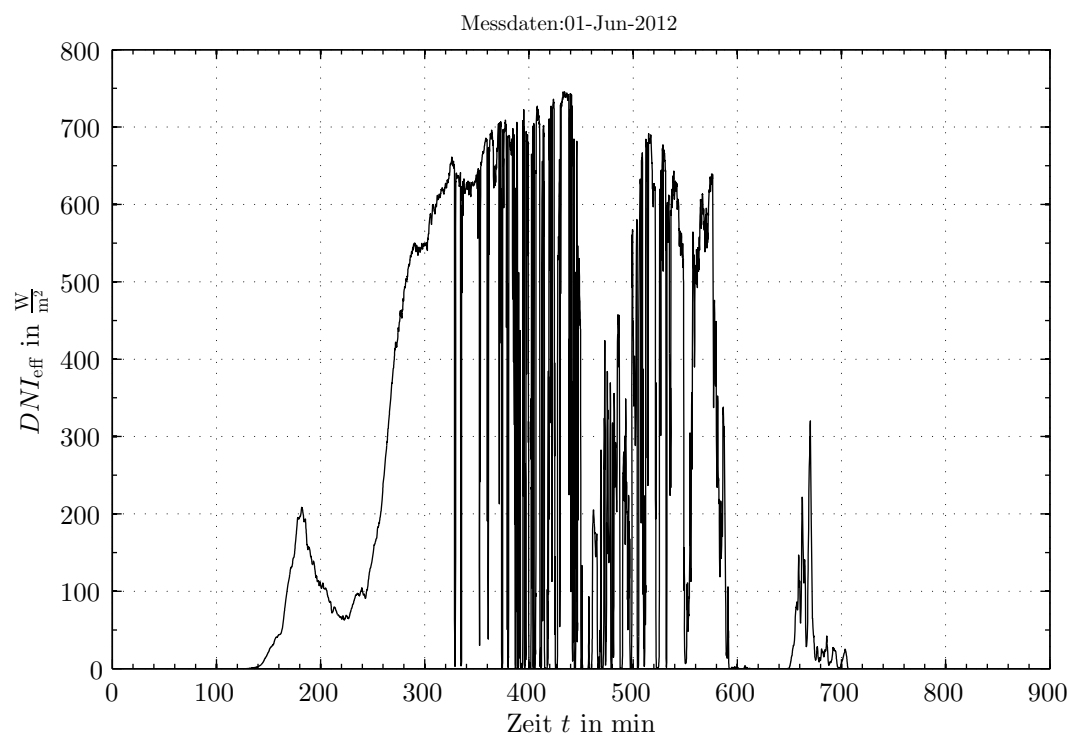
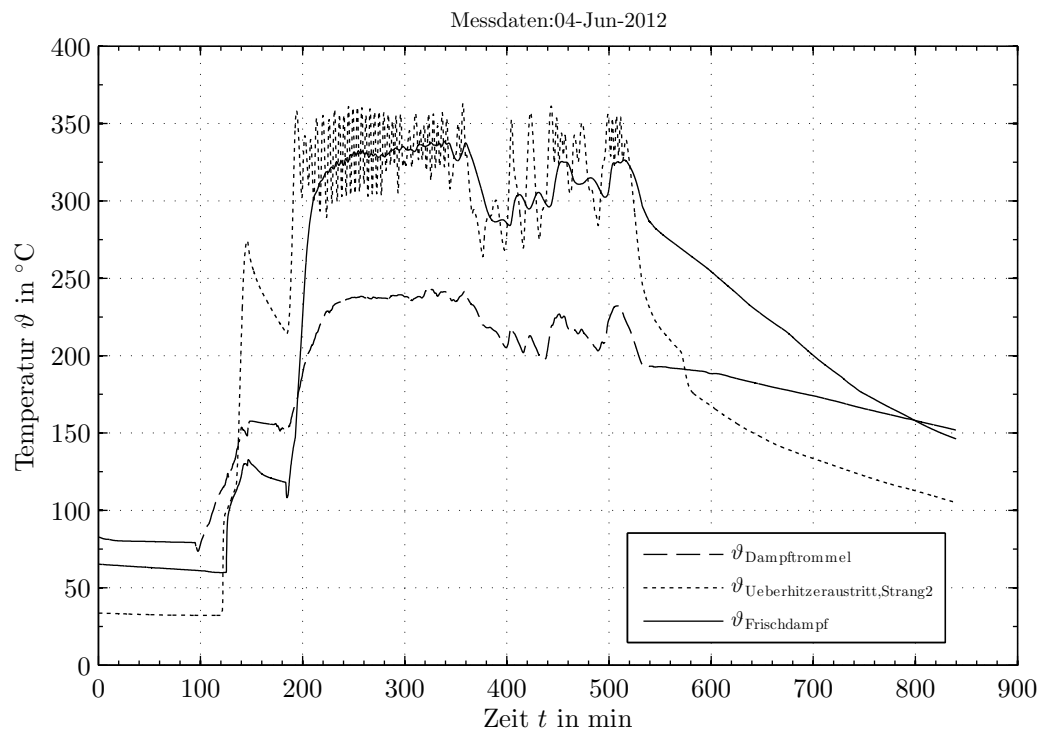
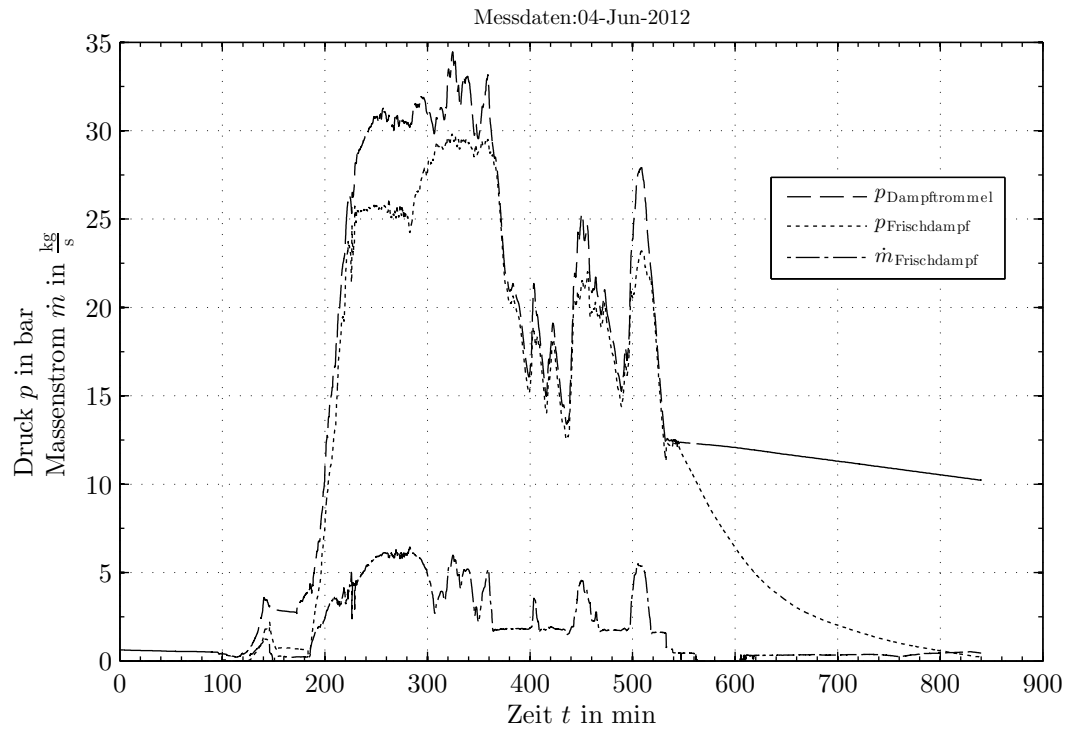
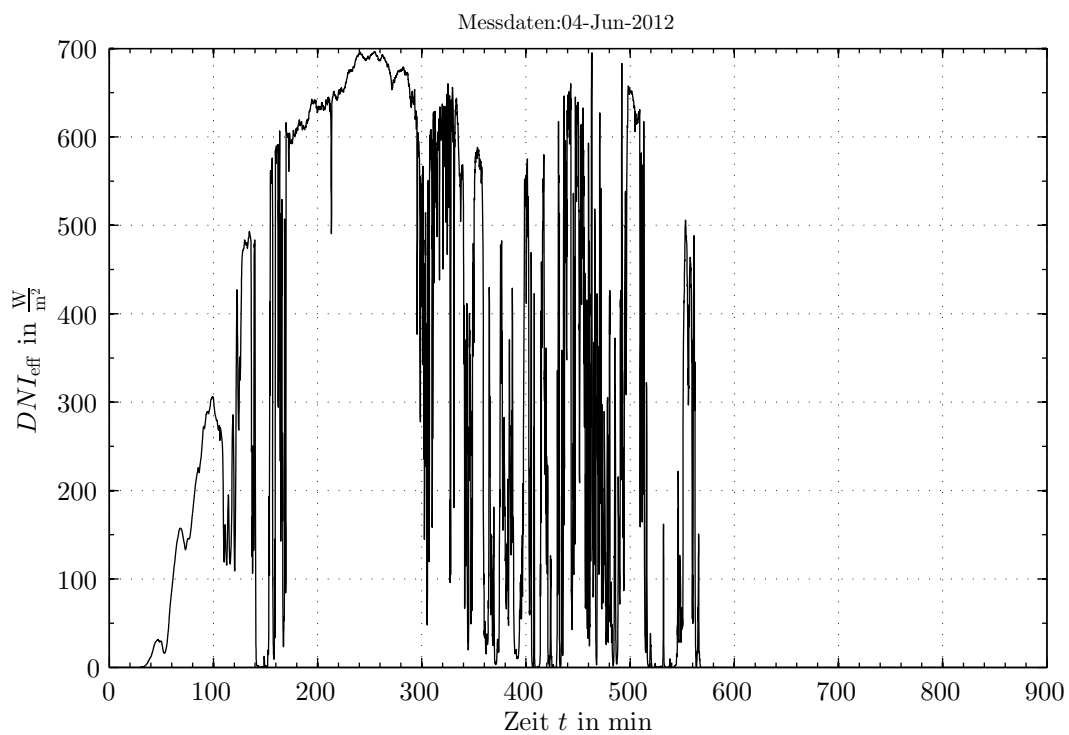


Bild A-8: Druck- und Massenstrommessungen vom 21.05.2012

**Bild A-9:** DNI_{eff} vom 21.05.2012**A.4 Gemessen am 01. Juni 2012****Bild A-10:** Temperaturmessungen vom 01.06.2012

**Bild A-11:** Druck- und Massenstrommessungen vom 01.06.2012**Bild A-12:** DNI_{eff} vom 01.06.2012

A.5 Gemessen am 04. Juni 2012**Bild A-13:** Temperaturmessungen vom 04.06.2012

**Bild A-14:** Druck- und Massenstrommessungen vom 04.06.2012**Bild A-15:** DNI_{eff} vom 04.06.2012

Anhang B Wärmeschaltbild der Turbine mit Vorwärmung

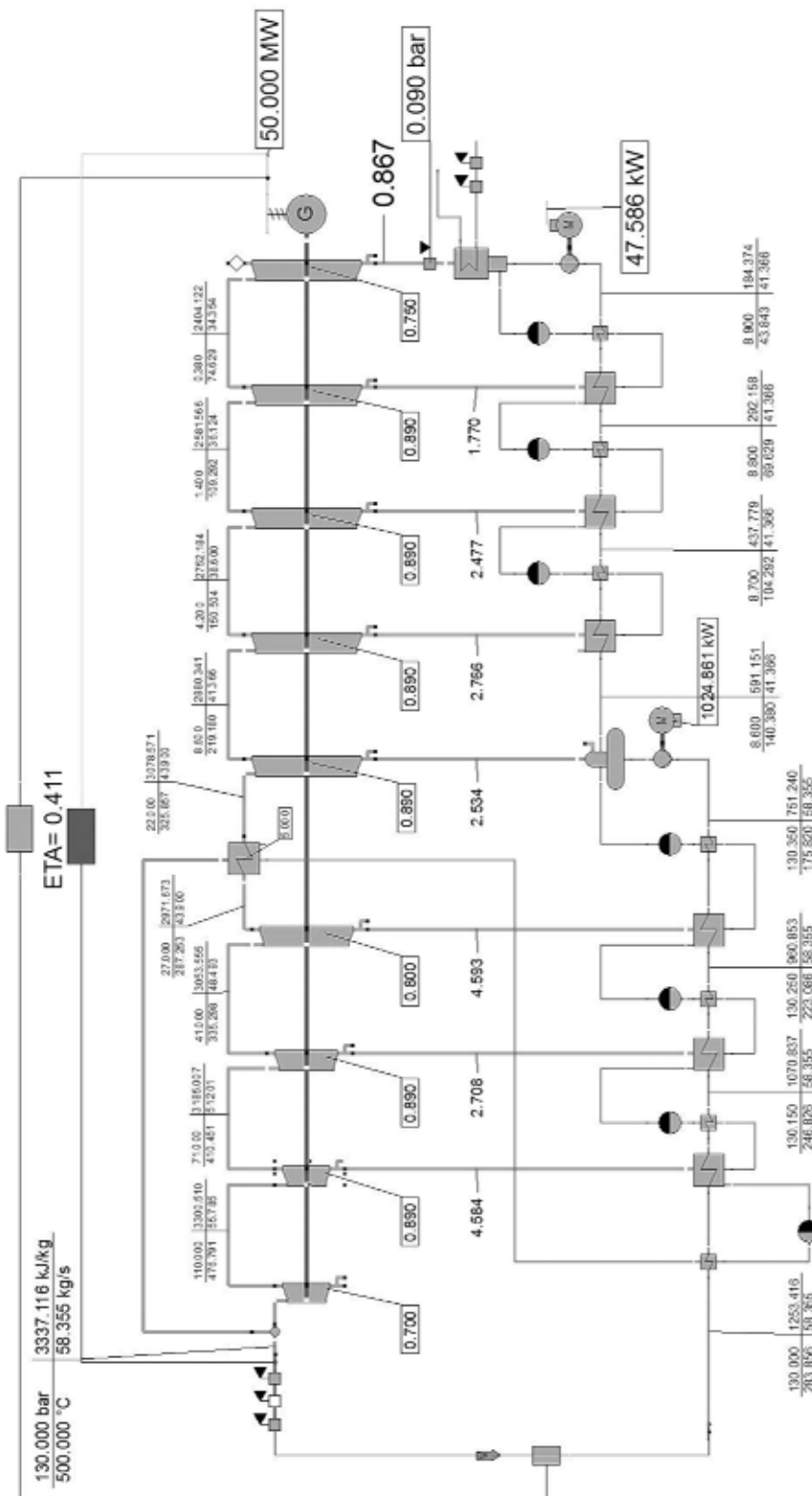


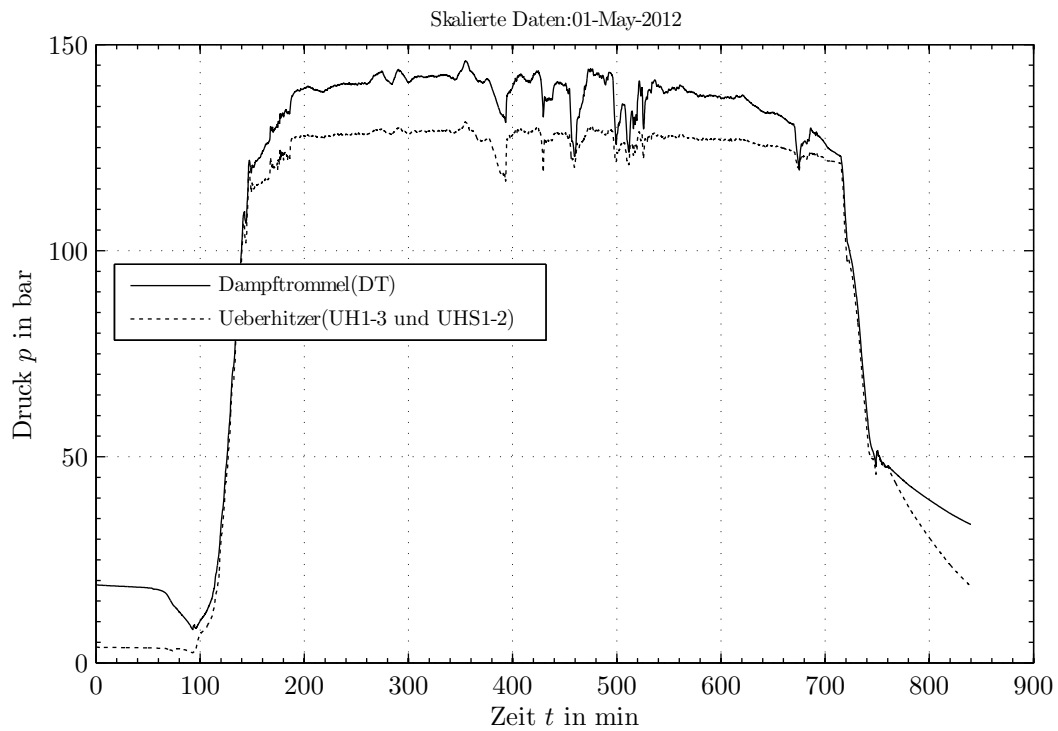
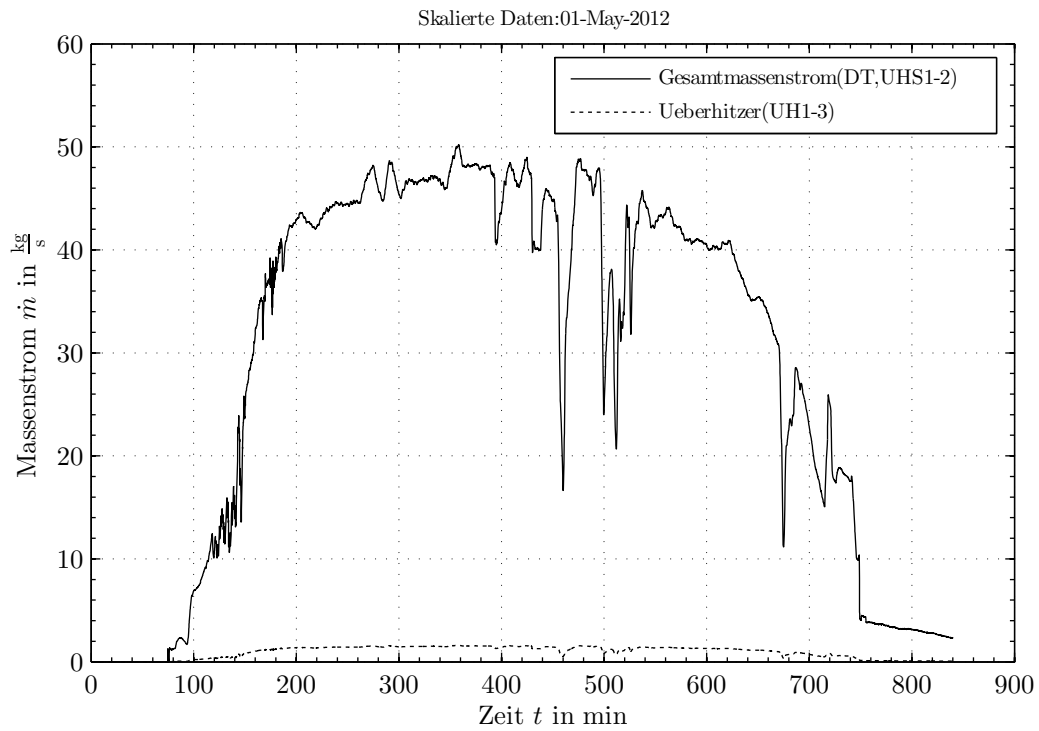
Bild B-1: Wärmeschaltbild der skalierten Dampfturbine

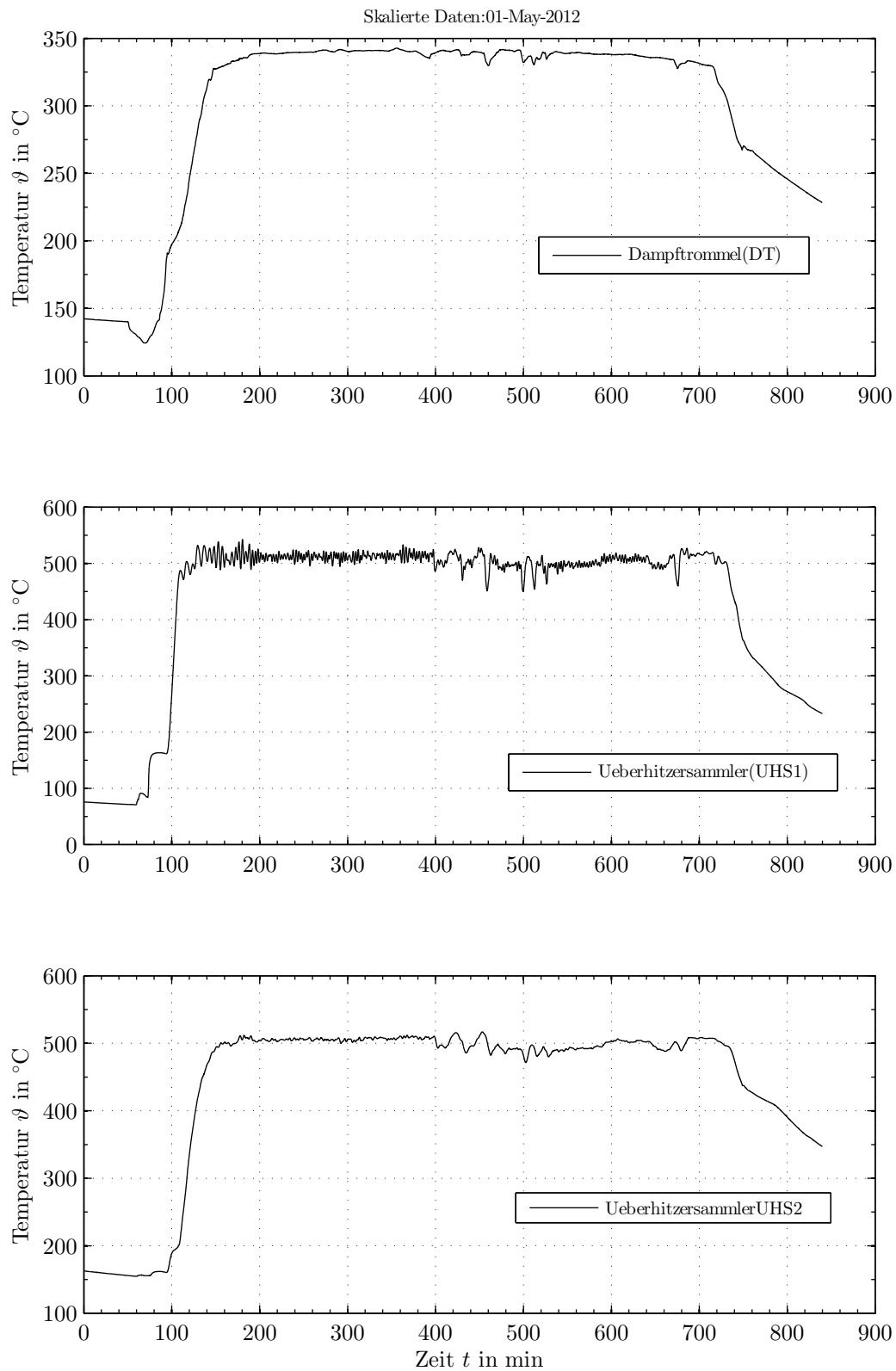
Anhang C Skalierte Prozessdaten

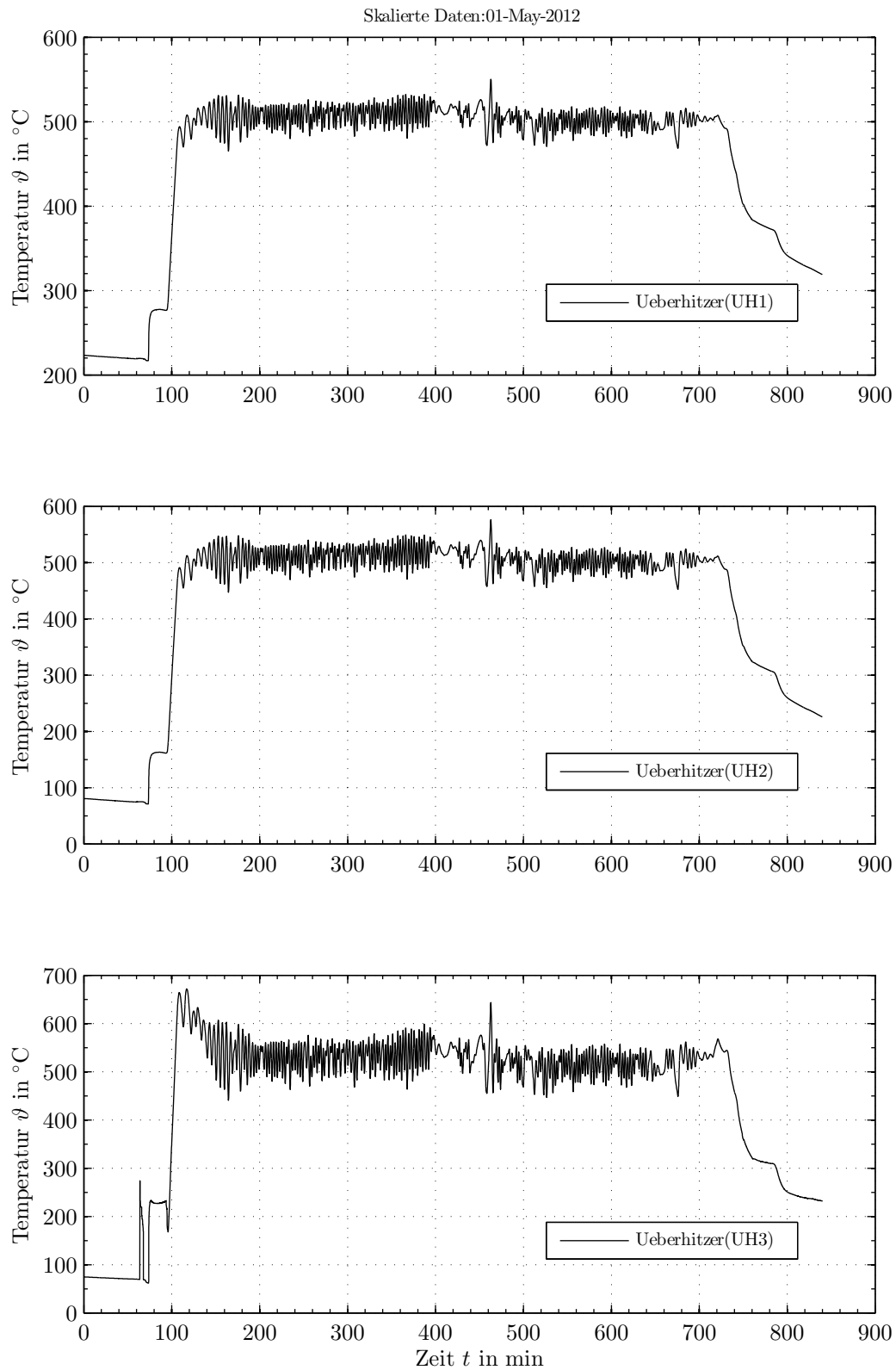
C.1 Skalierungsmatrix

Bauteil	Bezeichnung	Datensatz	Messgröße	verw. Messstellen	Reihe in Rohdaten	Skalierung
Dampftrommel	DT1	1	Druck	Trommeldruck, FD-Druck	17,40	Auslegungsdruckverhältnis
			Temperatur	Verdampferaustritt	13	Sattdampfentemperaturverhältnis
			Massenstrom	FD-Massenstrom	41	Auslegungsmassenstromverh.
Receiver am ÜH-Ende	ÜH1	2	Druck	Trommeldruck, FD-Druck	17,40	Auslegungsdruckverhältnis
			Temperatur	Loop Temp.	26	Auslegungstemperaturverhältnis
			Massenstrom	FD-Massenstrom/n_loop	41	Auslegungstemperaturdifferenz
			DNI_cos_phi	DNI_cos_phi	2	Faktor
	ÜH2	3	Druck	Trommeldruck, FD-Druck	17,40	Auslegungsdruckverhältnis
			Temperatur	Loop Temp.	26	Auslegungstemperaturverhältnis
			Massenstrom	FD-Massenstrom/n_loop	41	Faktor
			DNI_cos_phi	DNI_cos_phi	2	-
	ÜH3	4	Druck	Trommeldruck, FD-Druck	17,40	Auslegungsdruckverhältnis
			Temperatur	Loop Temp.	26	Auslegungsenthalpieverhältnis
			Massenstrom	FD-Massenstrom/n_loop	41	Faktor
			DNI_cos_phi	DNI_cos_phi	2	-
ÜH-Sammler	ÜHS1	5	Druck	Trommeldruck, FD-Druck	17,40	Auslegungsdruckverhältnis
			Temperatur	mittlere Looptemp.	(25),26,27,28,29,30,31	Auslegungstemperaturverhältnis
			Massenstrom	FD-Massenstrom	41	Auslegungsmassenstromverh.
	ÜHS2	6	Druck	Trommeldruck, FD-Druck	17,40	Auslegungsdruckverhältnis
			Temperatur	FD-Temp.	5	Auslegungstemperaturverhältnis
			Massenstrom	FD-Massenstrom	41	Auslegungsmassenstromverh.

Tabelle C-1: Zusammenfassung der angewendeten Skalierungen und der dazu herangezogenen Messdaten

C.2 Aus Messdaten vom 01. Mai 2012**Bild C-1:** Skalierte Drücke vom 01.05.2012**Bild C-2:** Skalierte Massenströme vom 01.05.2012

**Bild C-3:** Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 01.05.2012

**Bild C-4:** Skalierte Überhitzertemperaturen vom 01.05.2012

C.3 Aus Messdaten vom 11. Mai 2012

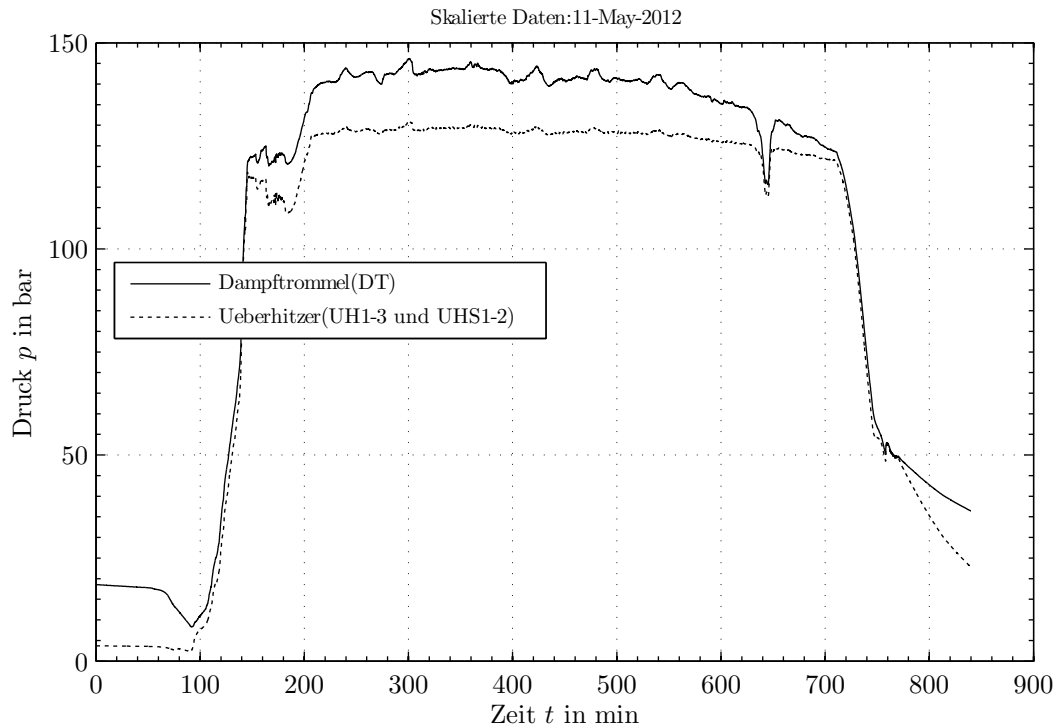


Bild C-5: Skalierte Drücke vom 11.05.2012

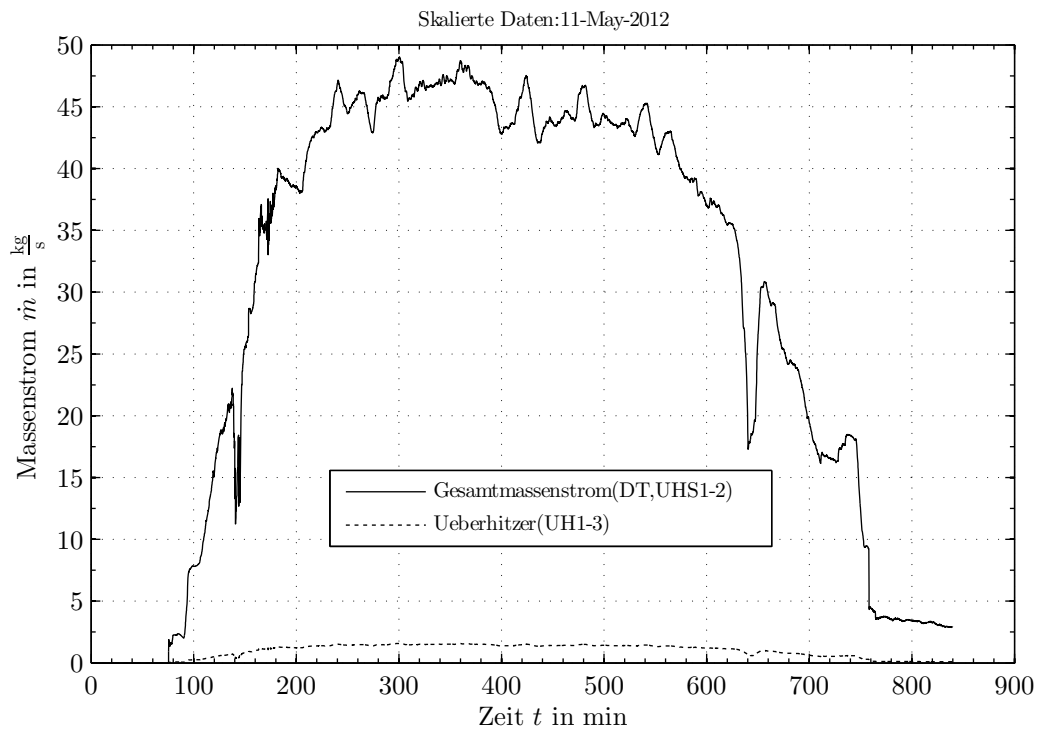
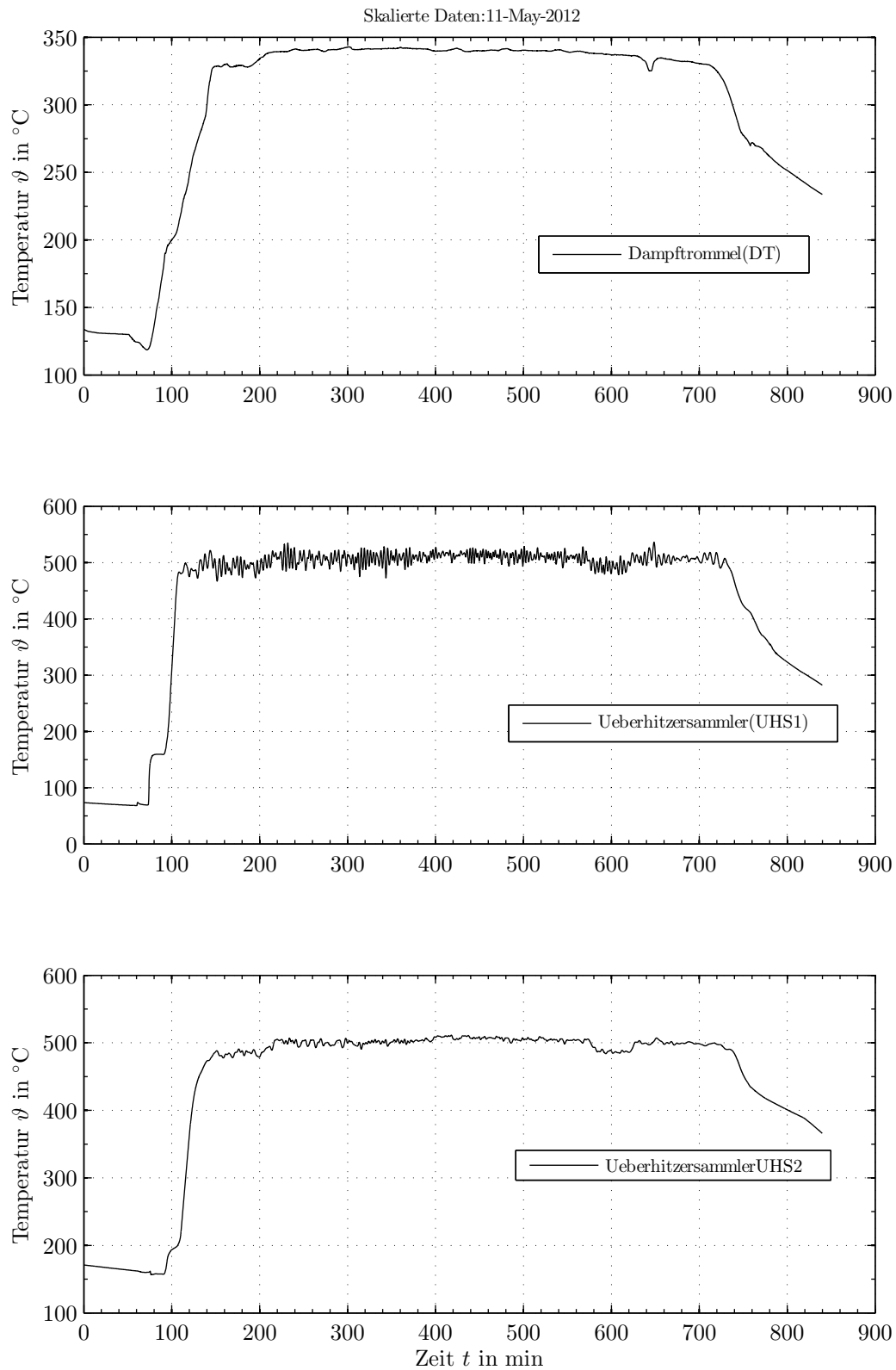
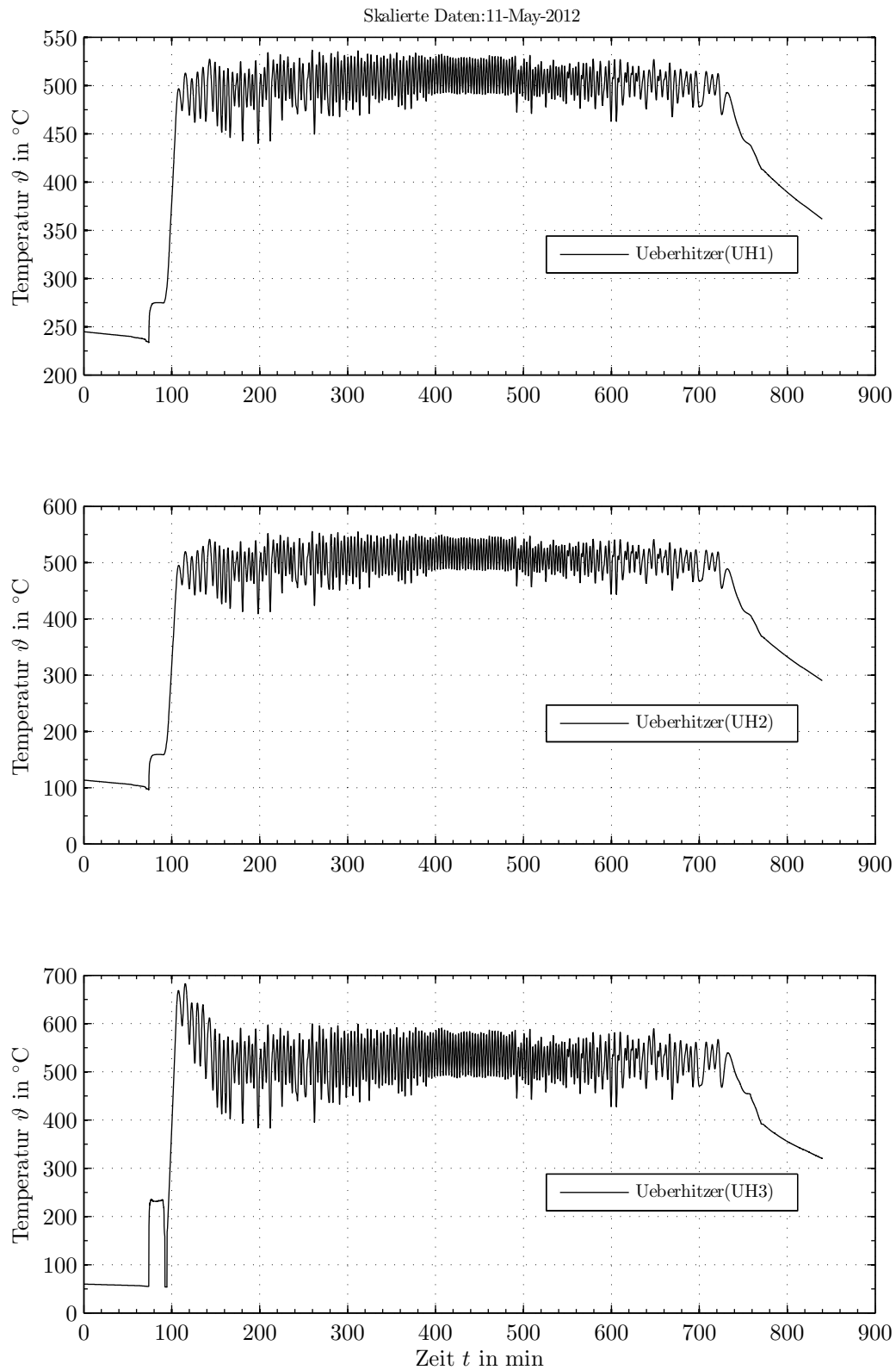
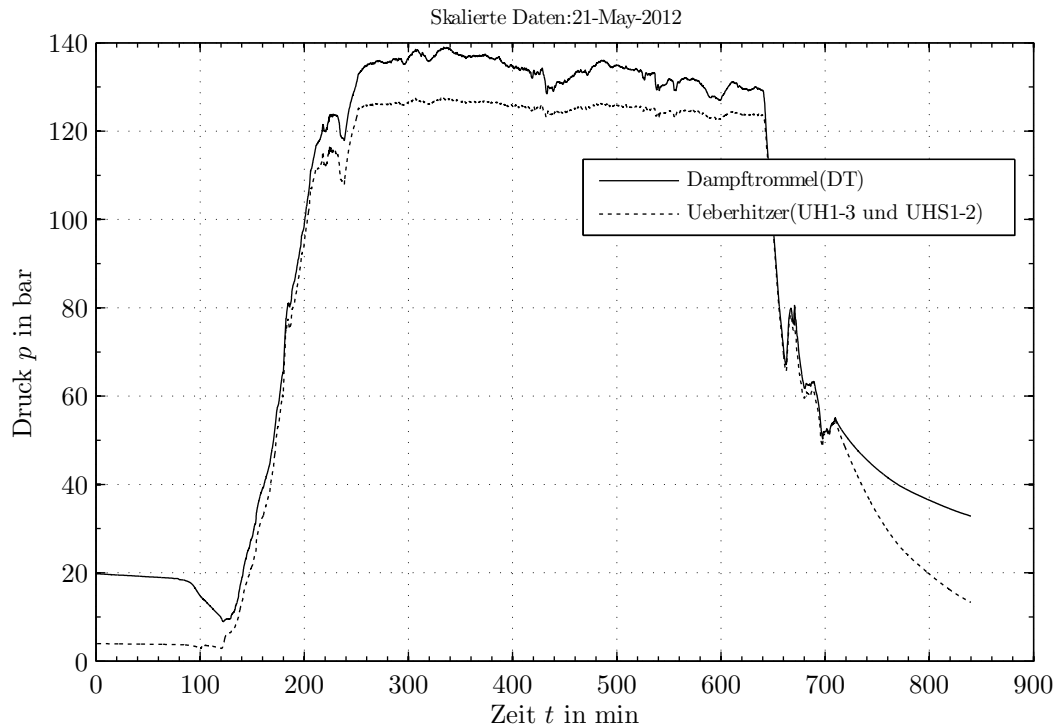
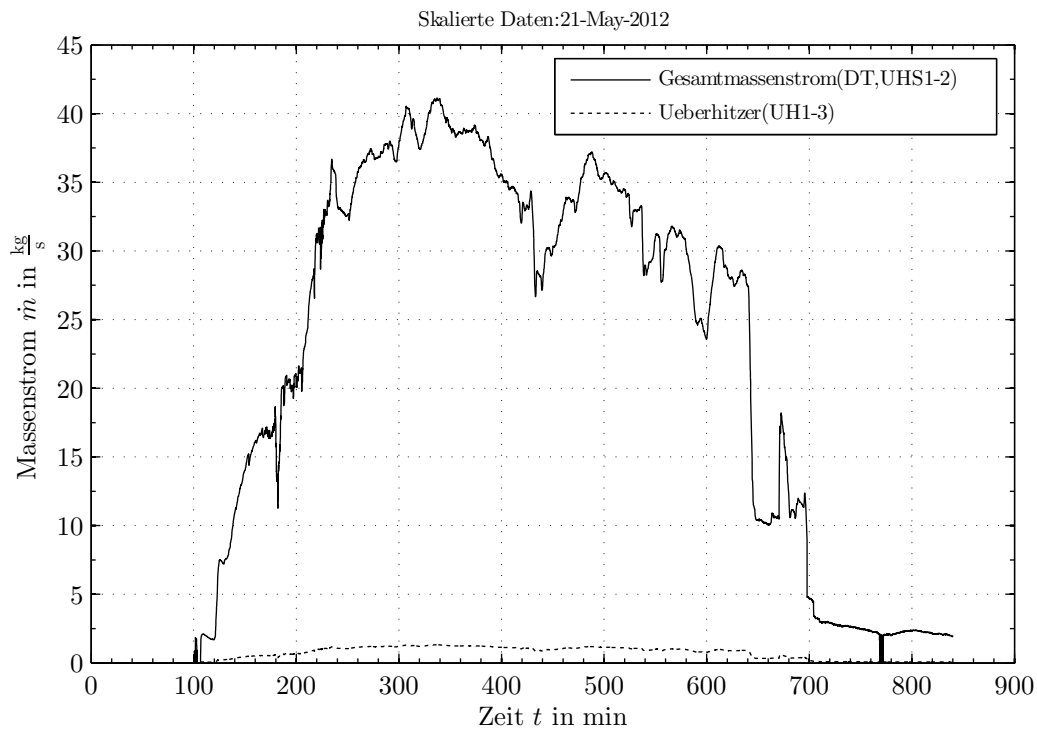
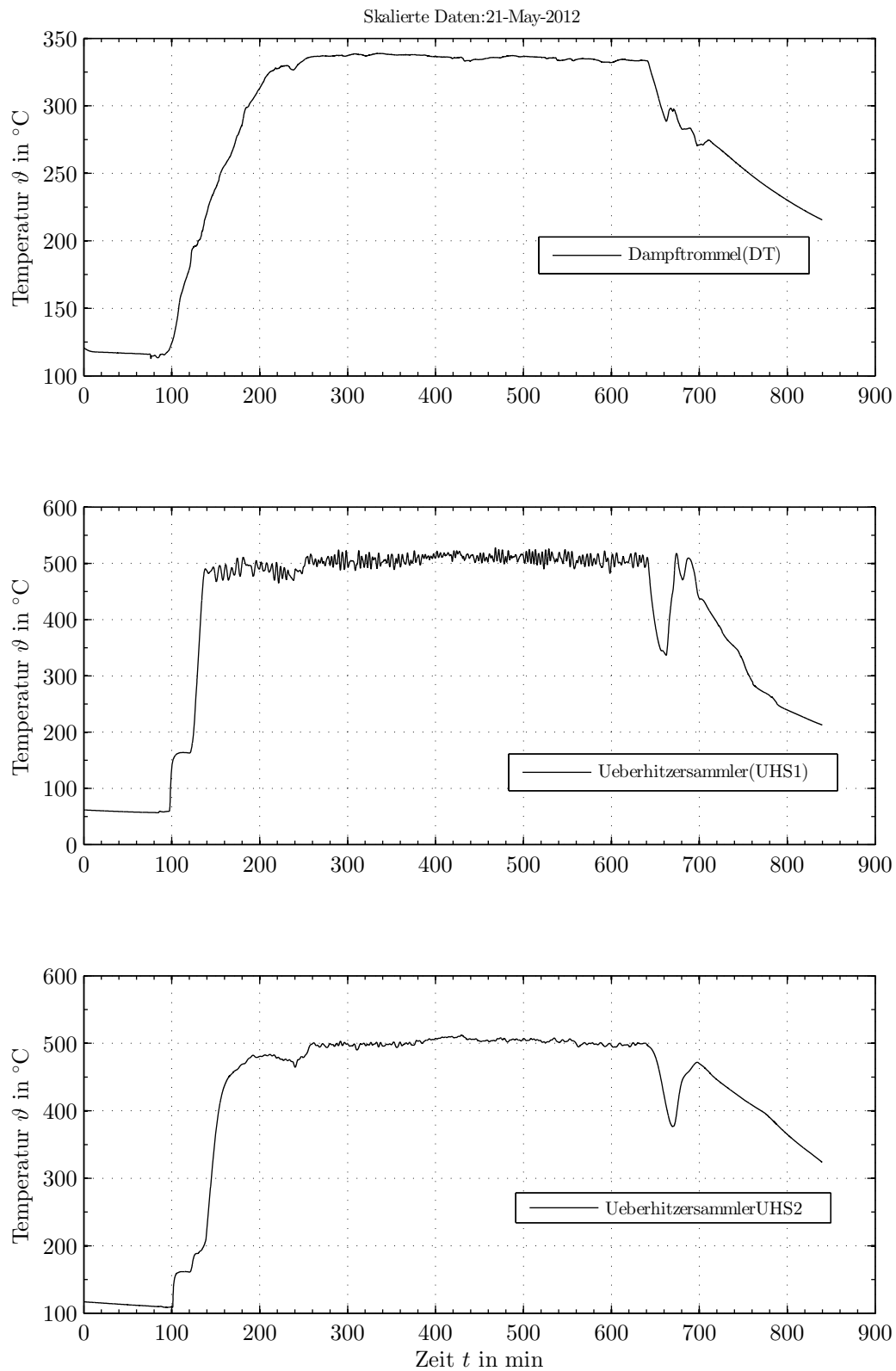


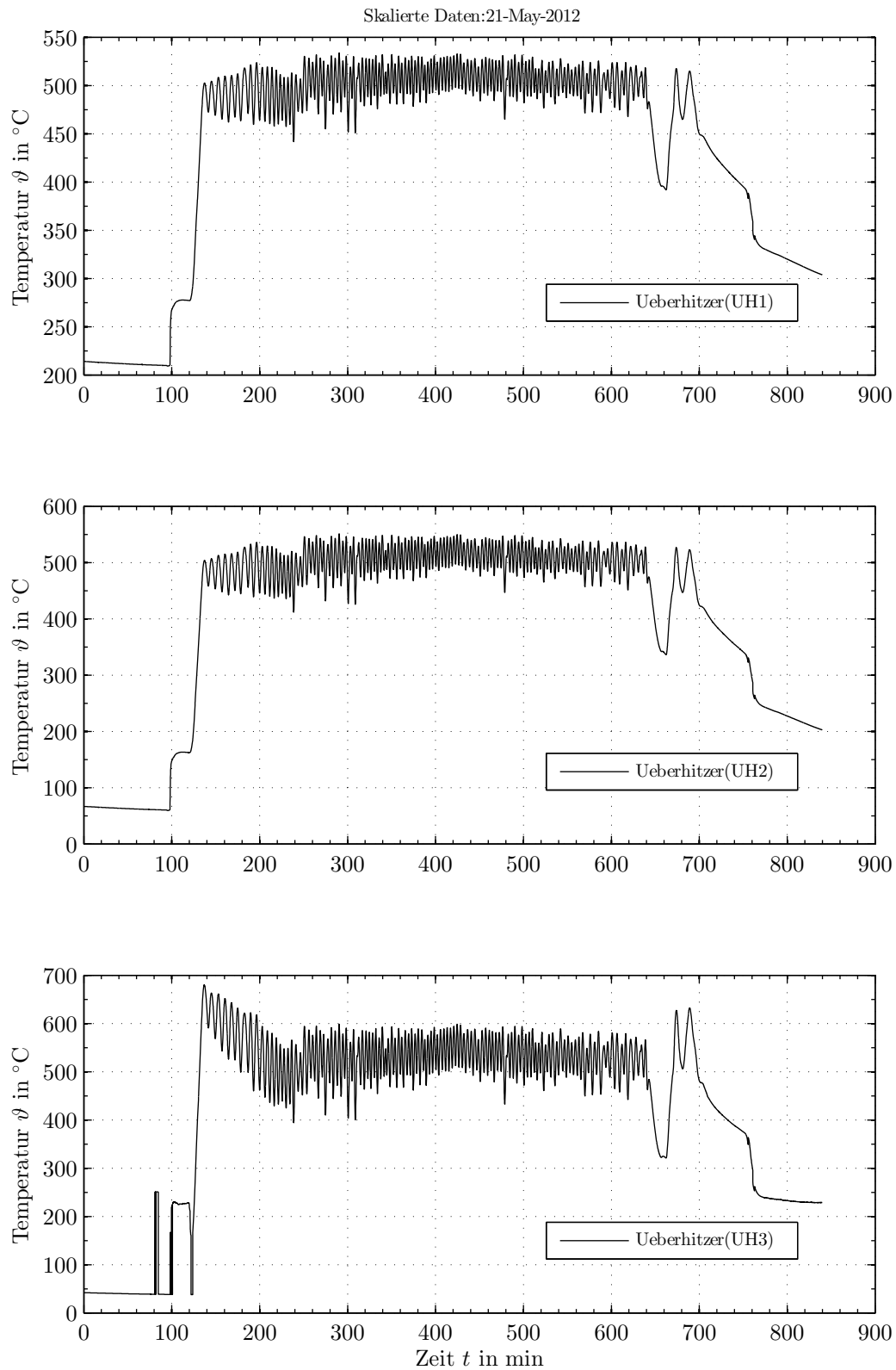
Bild C-6: Skalierte Massenströme vom 11.05.2012

**Bild C-7:** Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 11.05.2012

**Bild C-8:** Skalierte Überhitzertemperaturen vom 11.05.2012

C.4 Aus Messdaten vom 21. Mai 2012**Bild C-9:** Skalierte Drücke vom 21.05.2012**Bild C-10:** Skalierte Massenströme vom 21.05.2012

**Bild C-11:** Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 21.05.2012

**Bild C-12:** Skalierte Überhitzertemperaturen vom 21.05.2012

C.5 Aus Messdaten vom 01. Juni 2012

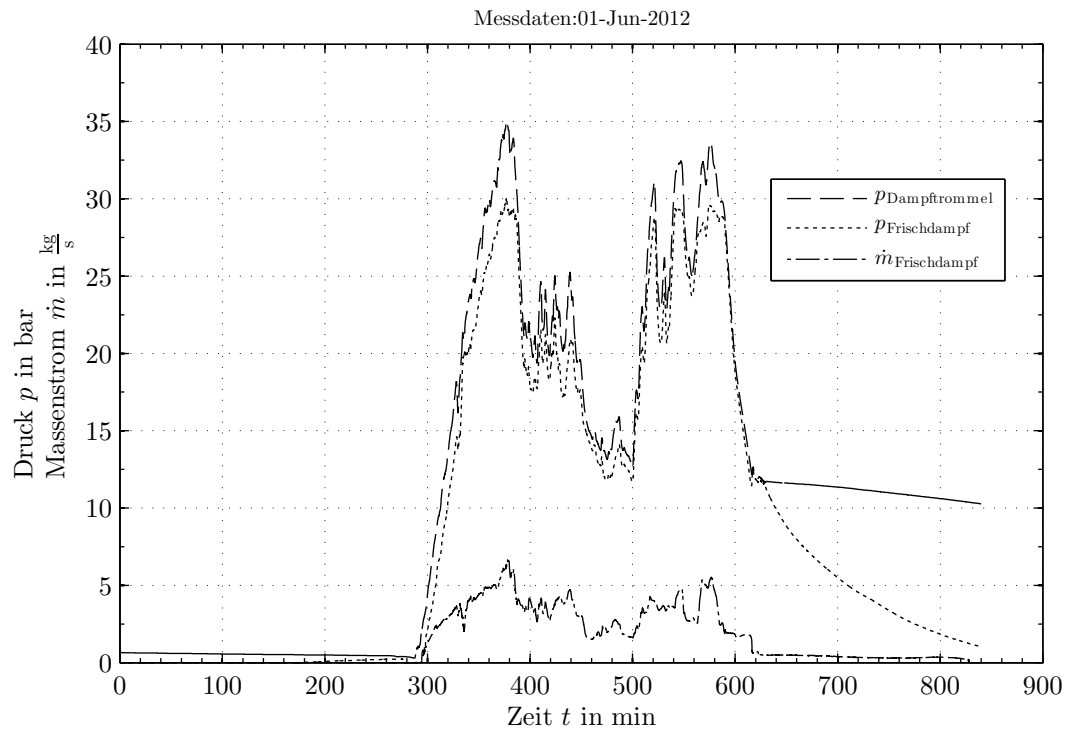


Bild C-13: Skalierte Drücke vom 01.06.2012

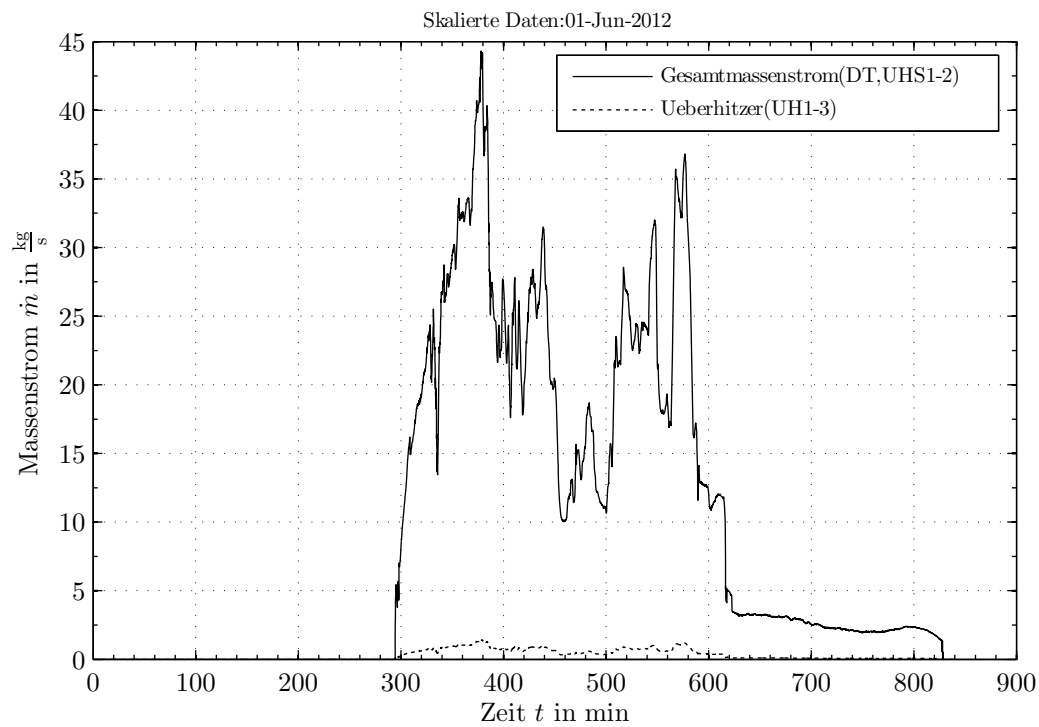
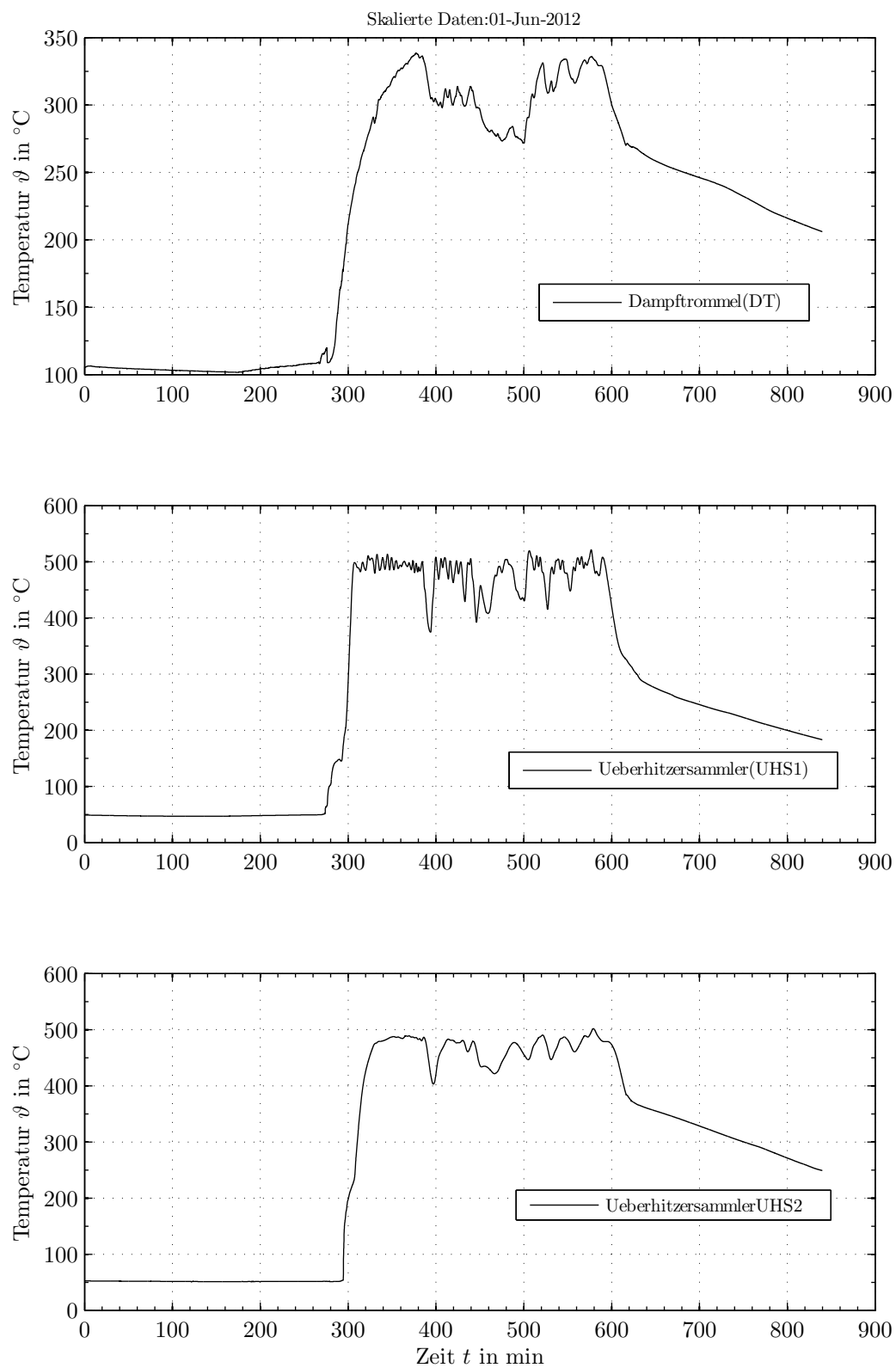
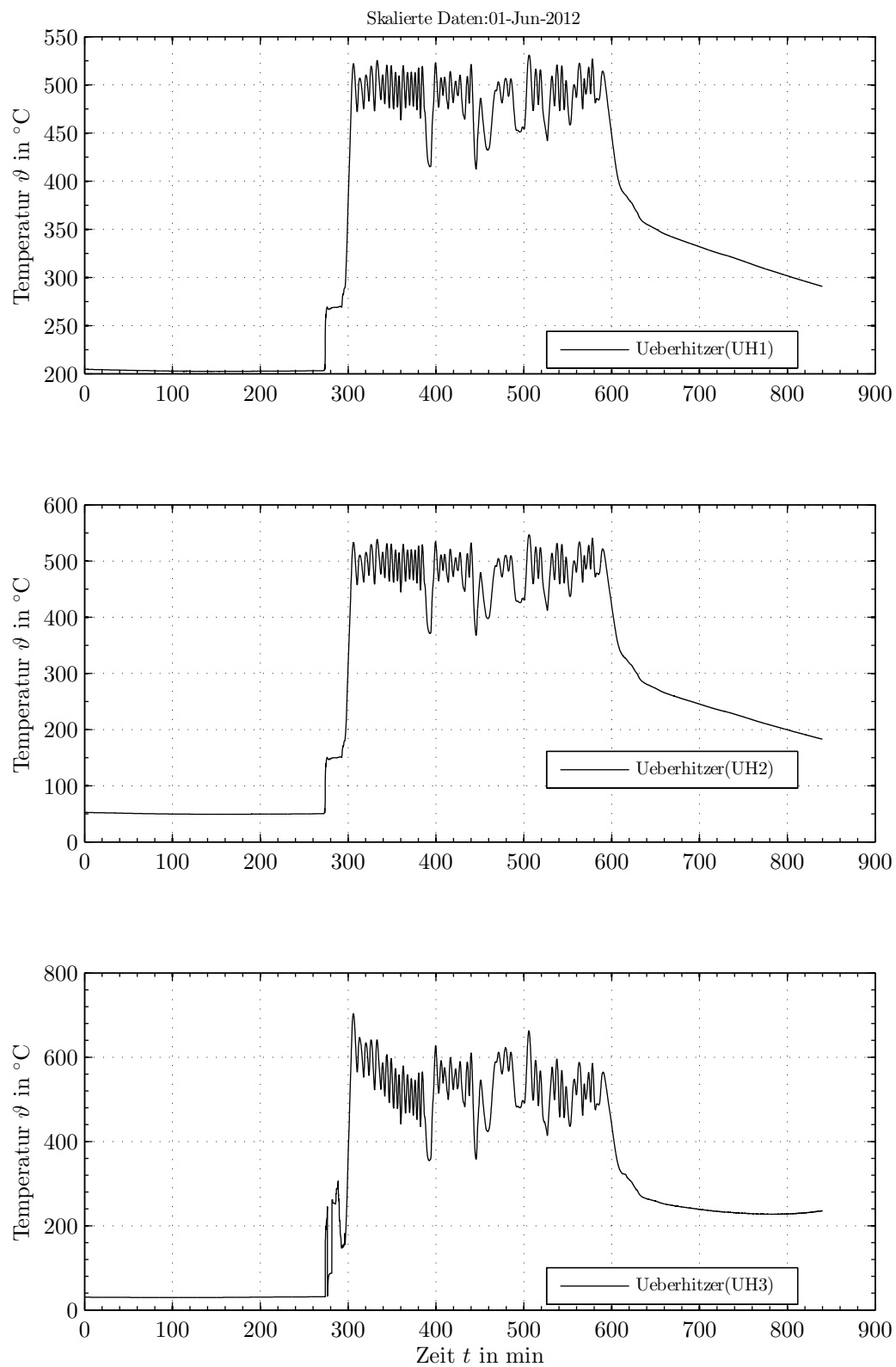
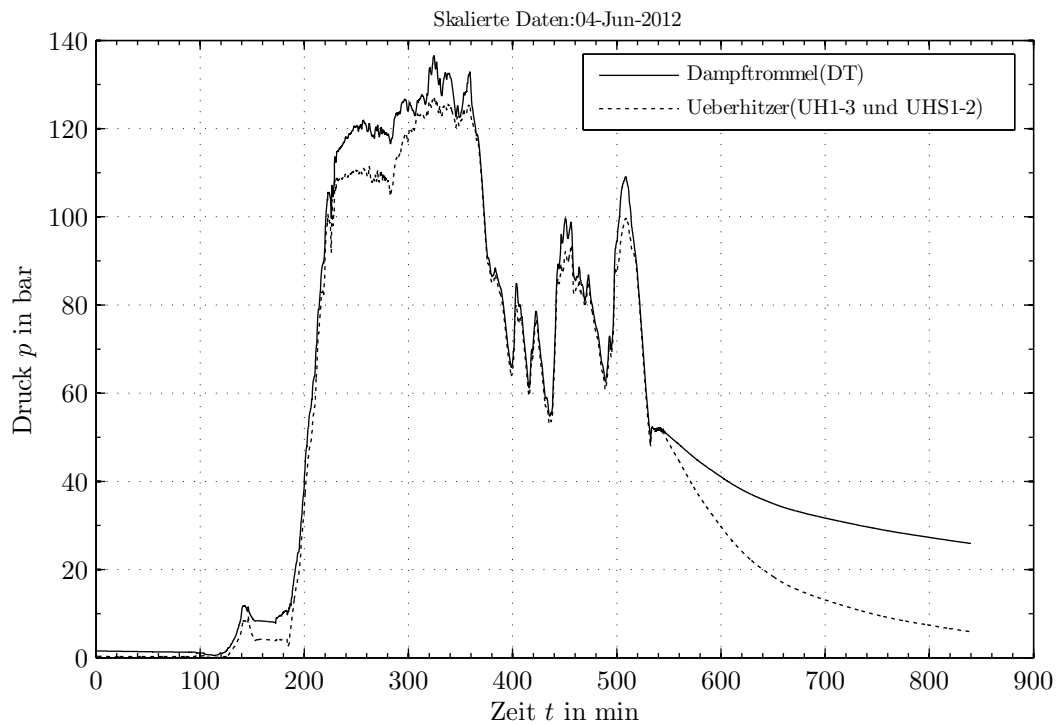
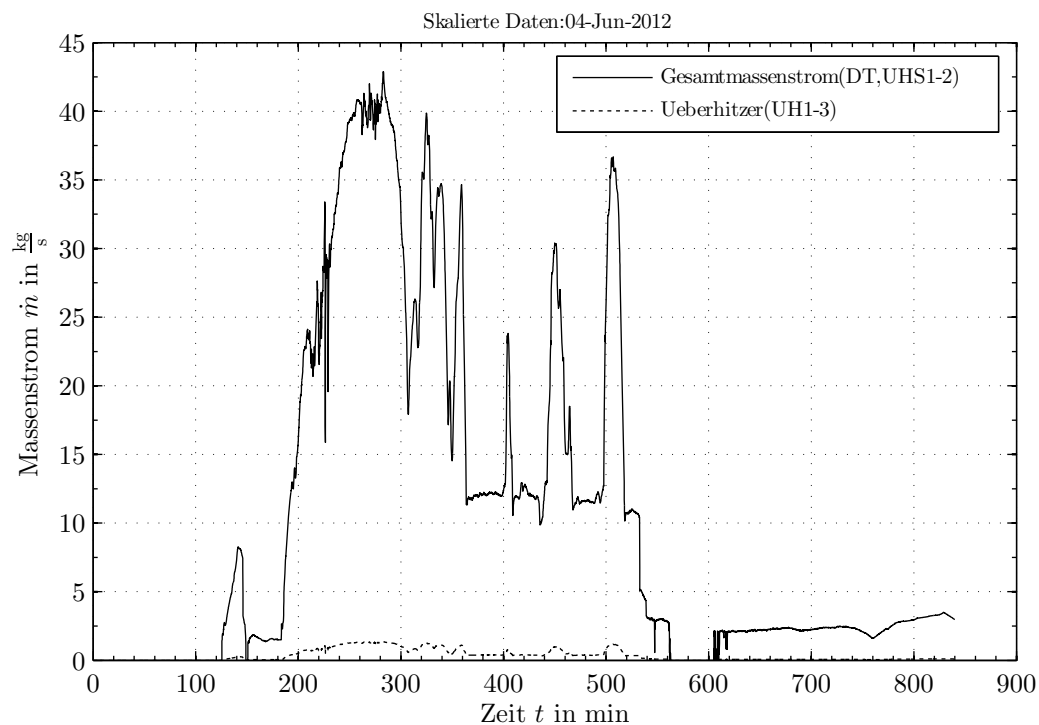
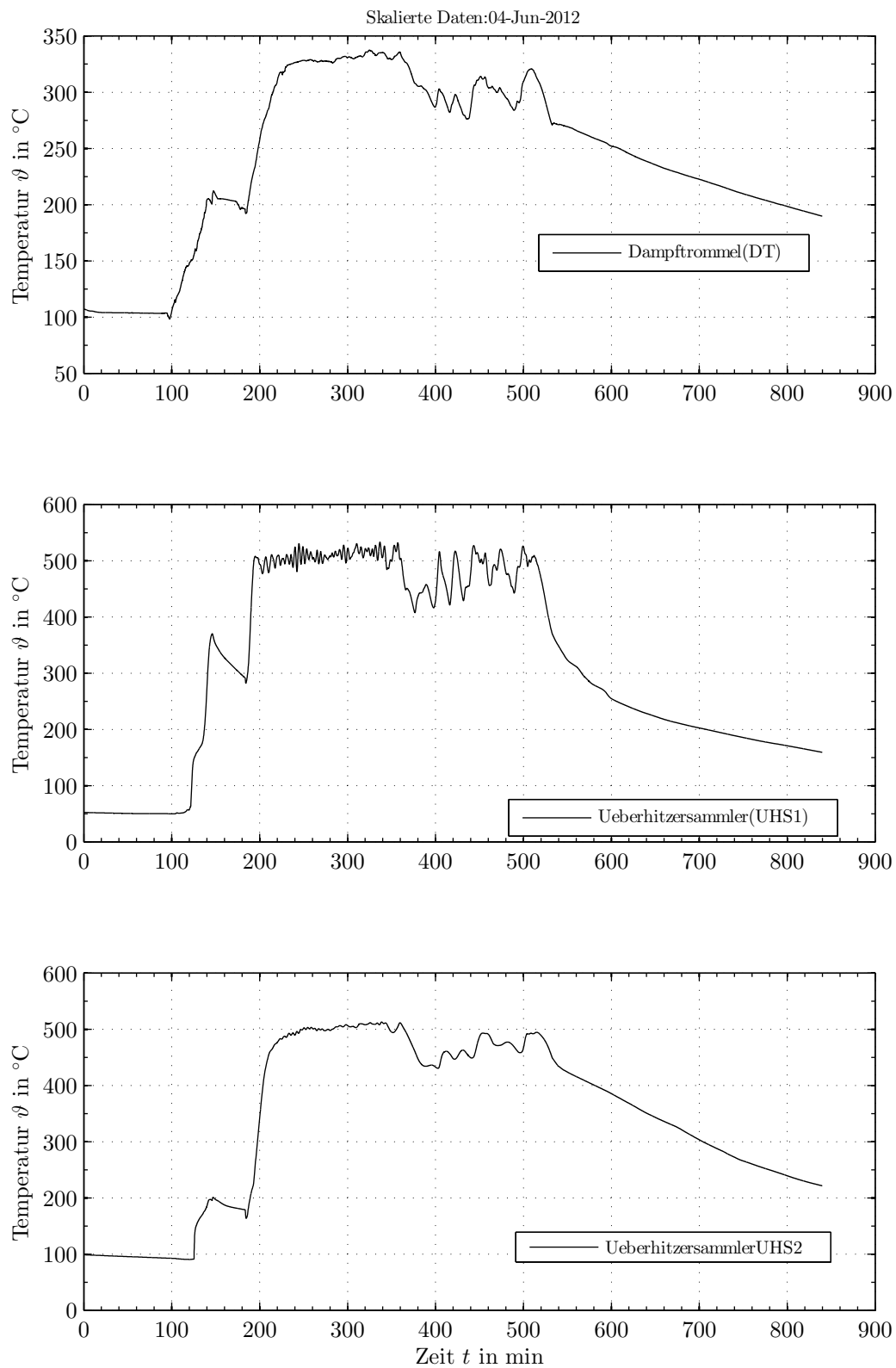


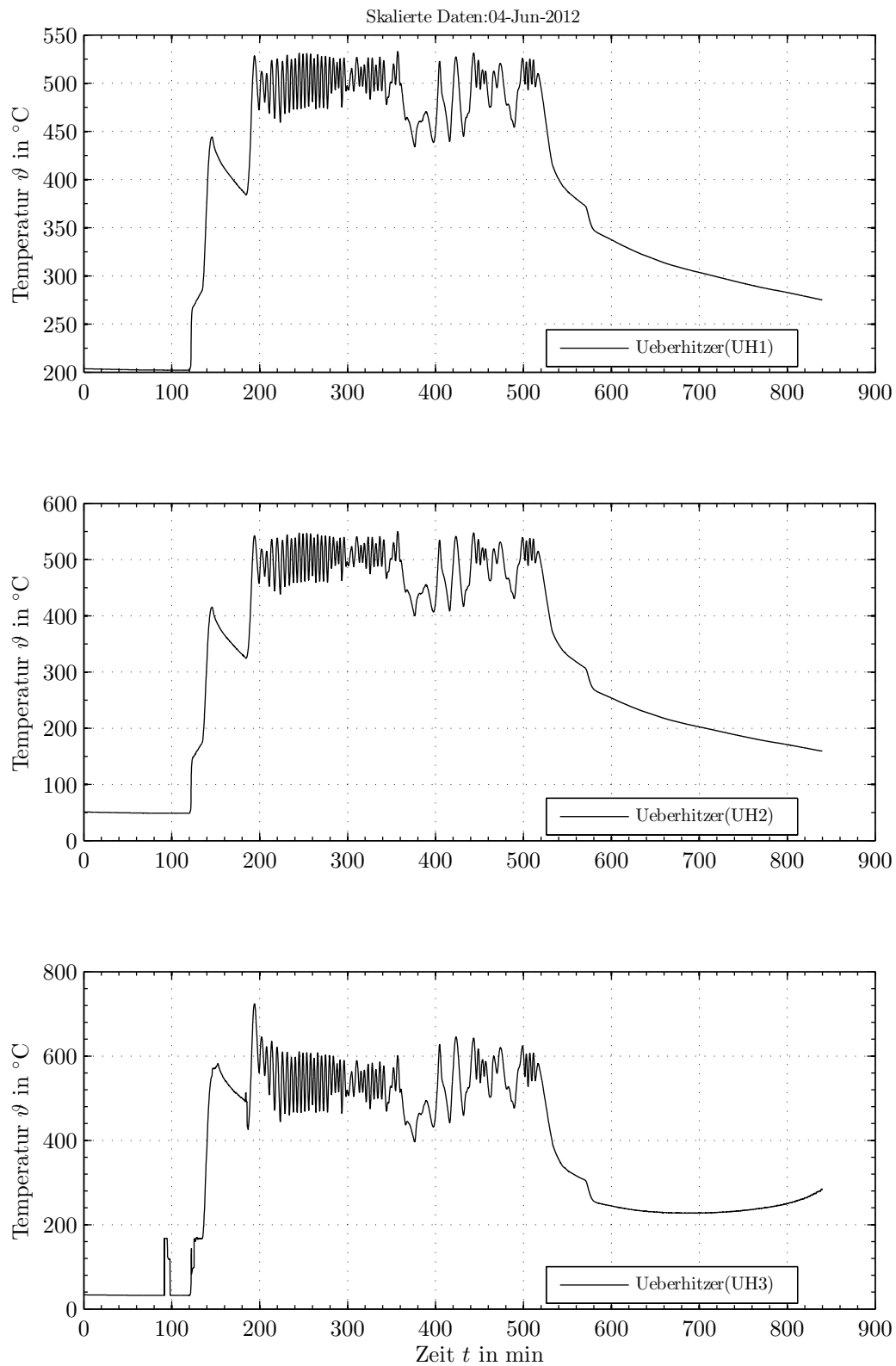
Bild C-14: Skalierte Massenströme vom 01.06.2012

**Bild C-15:** Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 01.06.2012

**Bild C-16:** Skalierte Überhitzertemperaturen vom 01.06.2012

C.6 Aus Messdaten vom 04. Juni 2012**BildC-17:** Skalierte Drücke vom 04.06.2012**Bild C-18:** Skalierte Massenströme vom 04.06.2012

**Bild C-19:** Skalierte Trommel- und ÜH-Sammlertemperaturen vom 04.06.2012

**Bild C-20:** Skalierte Überhitzertemperaturen vom 04.06.2012

Anhang D Auslegungsdaten

Bauteil		HD-Trommel		FD-Sammler		FD-Leitung		Receiver
Druck	bara	150	150	135	135	130	130	135
Temperatur	°C	345	345	530	530	530	530	580
Massenstrom	kg/s			2	60	60	60	2
empf. Strömungsgeschw	m/s			20	30	40	40	20
empf. Durchmesser	mm			56	252	223	223	59
Werkstoff		15NiCuMoNb5-6-4		X10CrMoVNb9-1		X10CrMoVNb9-1		X10CrMoVNb9-1
Rp02,tc	N/mm ²	342	342	282	282	282	282	237
Rm,tc,2E5	N/mm ²	298,4	298,4	151,2	151,2	151,2	151,2	88
zul. Spannung	N/mm ²	228,0	228,0	121,0	121,0	121,0	121,0	70,4
sigma_zul/p		15,2	15,2	9,0	9,0	9,3	9,3	5,2
Simulation		A		B	C	D		E
Schnitt		1	2	3	4	5	6	7
Benennung		Dampfstutzen	kl. Stutzen	1. Loop	letzter Loop	HD-Bypass	kl. Stutzen	Receiver
dis	mm	1800	1800	57	400	300	300	57
dib	mm	400	65	57	57	250	65	0
dib/dis		0,222	0,036	1,000	0,143	0,833	0,217	0,000
e_s gewählt	mm	75	75	6,5	32	30	25	6,5
e_b/e_s gewählt		0,80	0,20	1,00	0,18	0,90	0,20	0,00
e_b gewählt	mm	60,0	15,0	6,50	5,60	27	5	0
lrs	mm	375	375	20	118	99	90	20
lrb	mm	166	35	20	19	86	19	0
Ap	mm ²	619726	383813	2341	31781	52285	20566	579
Afs	mm ²	32625	29250	174	3942	3795	2378	132
Afb	mm ²	9968	520	132	105	2335	94	0
Verschw. v		0,825	0,931	0,574	0,796	0,586	0,721	1,000
alpha_m		3,08	2,73	3,25	3,52	3,49	4,06	2,20
alpha_t		1,38	1,85	0,94	1,57	0,90	1,43	2,00
Spannung	N/mm ²	225,75	200,89	109,90	112,78	117,38	114,66	65,94
Sicherheit Rp02,tc		1,51	1,70	2,57	2,50	2,40	2,46	3,59
Sicherheit Rm,tc,2E5		1,32	1,49	1,38	1,34	1,29	1,32	1,33

Tabelle D-1: Auslegungszahlenwerte in der Übersicht

Anhang E Simulationsergebnisse

E.1 Testrechnungen

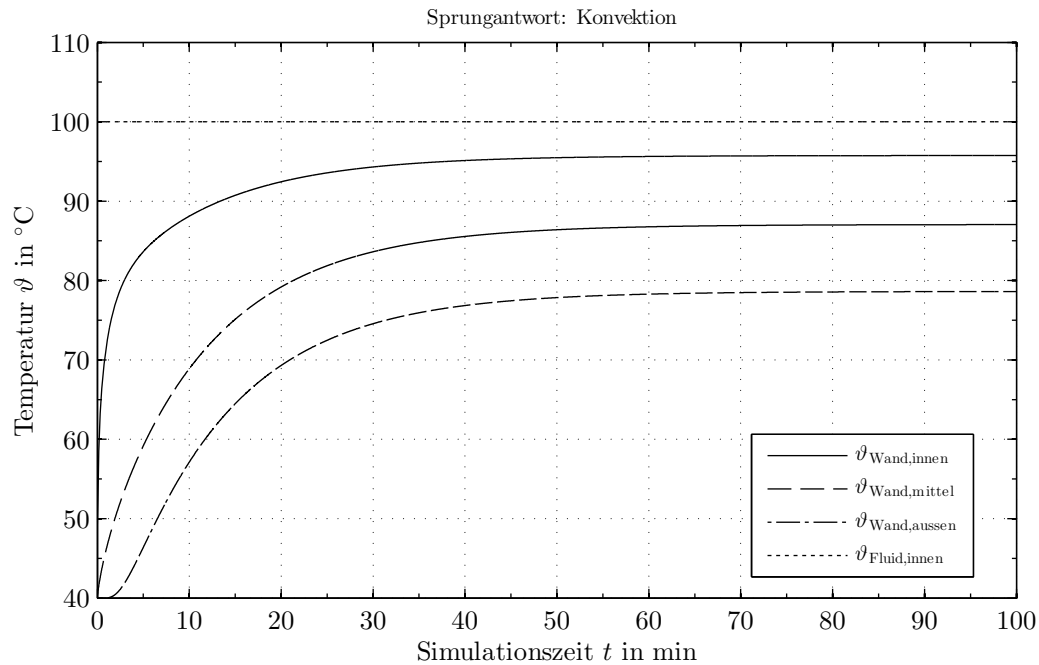


Bild E-1: Testsimulation mit Innendurchmesser: 1 m, Wandstärke: 100 mm, Wärmeübergangskoeffizient: 1 000 W/m²/K (innen) und 100 W/m²/K (außen), Fluid-Außentemperatur: 40 °C, Fluid-Innentemperatur: Sprung von 40 °C auf 100 °C, Anfangsbedingung: 40 °C, Zeitschrittweite: 1 s, Radiuschrittweite: 1 mm

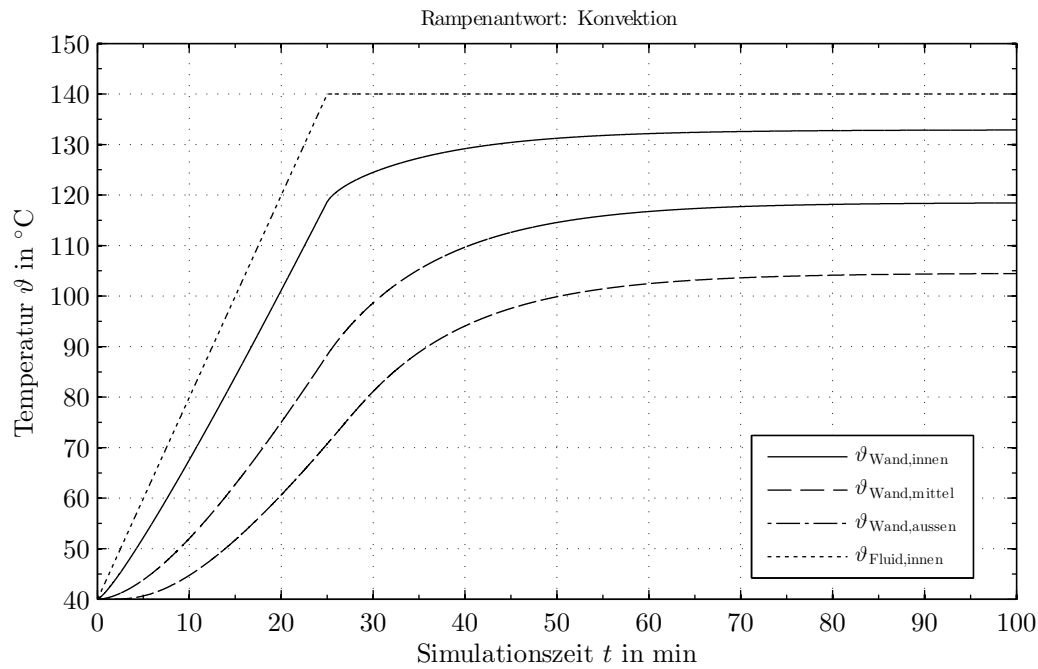


Bild E-2: Testsimulation mit Innendurchmesser: 1 m, Wandstärke: 100 mm, Wärmeübergangskoeffizient: 1 000 W/m²/K (innen) und 100 W/m²/K (außen), Fluid-Außentemperatur: 40 °C, Fluid-Innentemperatur: Rampe von 40 °C auf 140 °C mit 4 K/Minute, Anfangsbedingung: 40 °C, Zeitschrittweite: 1 s, Radiusschrittweite: 1 mm

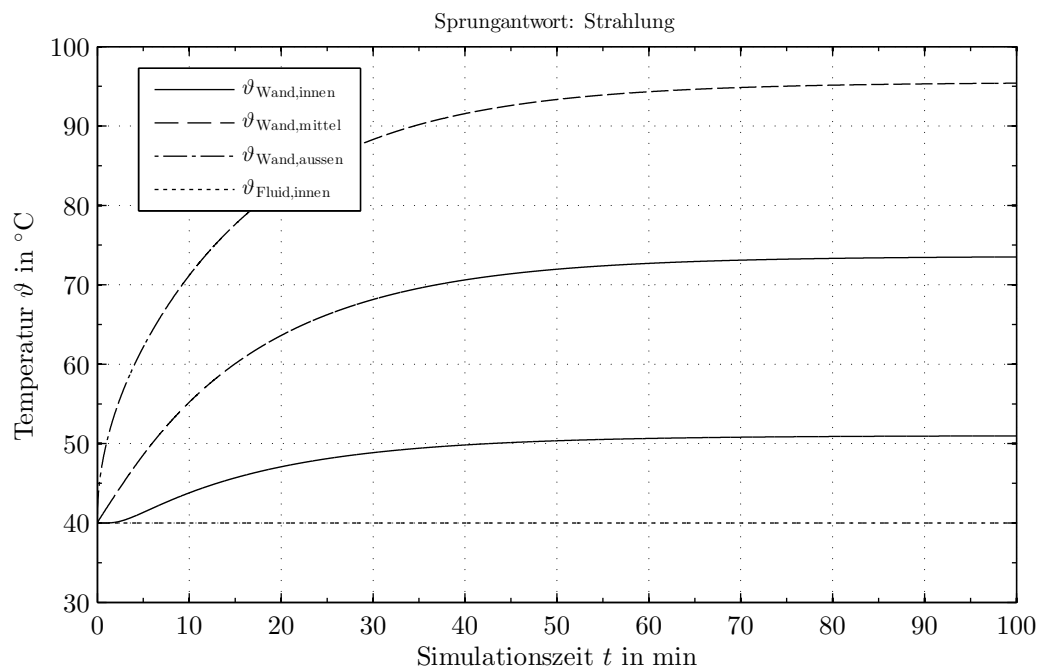


Bild E-3: Testsimulation mit Innendurchmesser: 1 m, Wandstärke: 100 mm, Wärmeübergangskoeffizient: 1 000 W/m²/K (innen), Fluid-Innentemperatur: 40 °C, Bestrahlungsstärke: 1 0000 W/m², Anfangsbedingung: 40 °C, Zeitschrittweite: 1 s, Radiusschrittweite: 1 mm

E.2 Dampftrommel

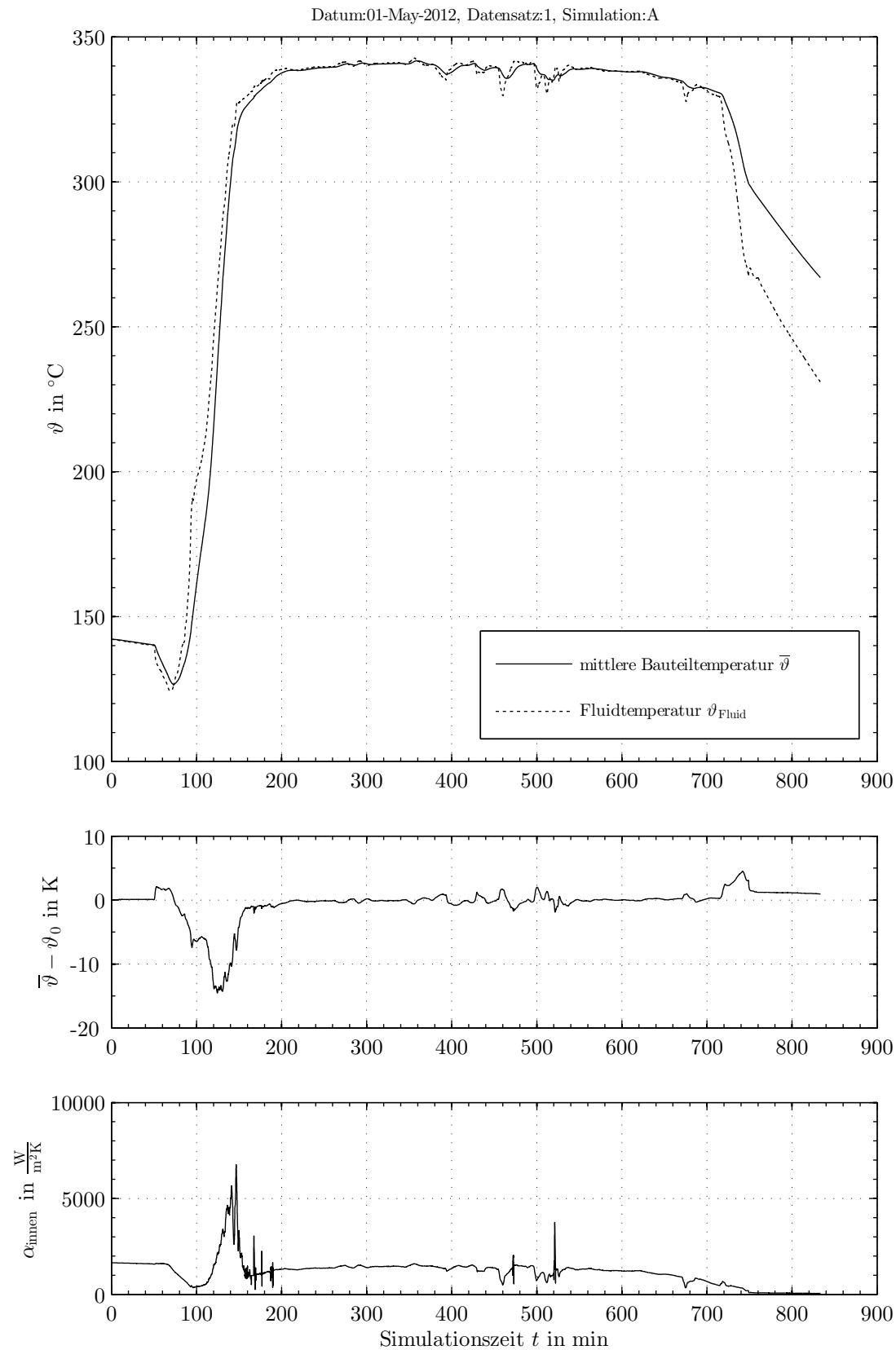
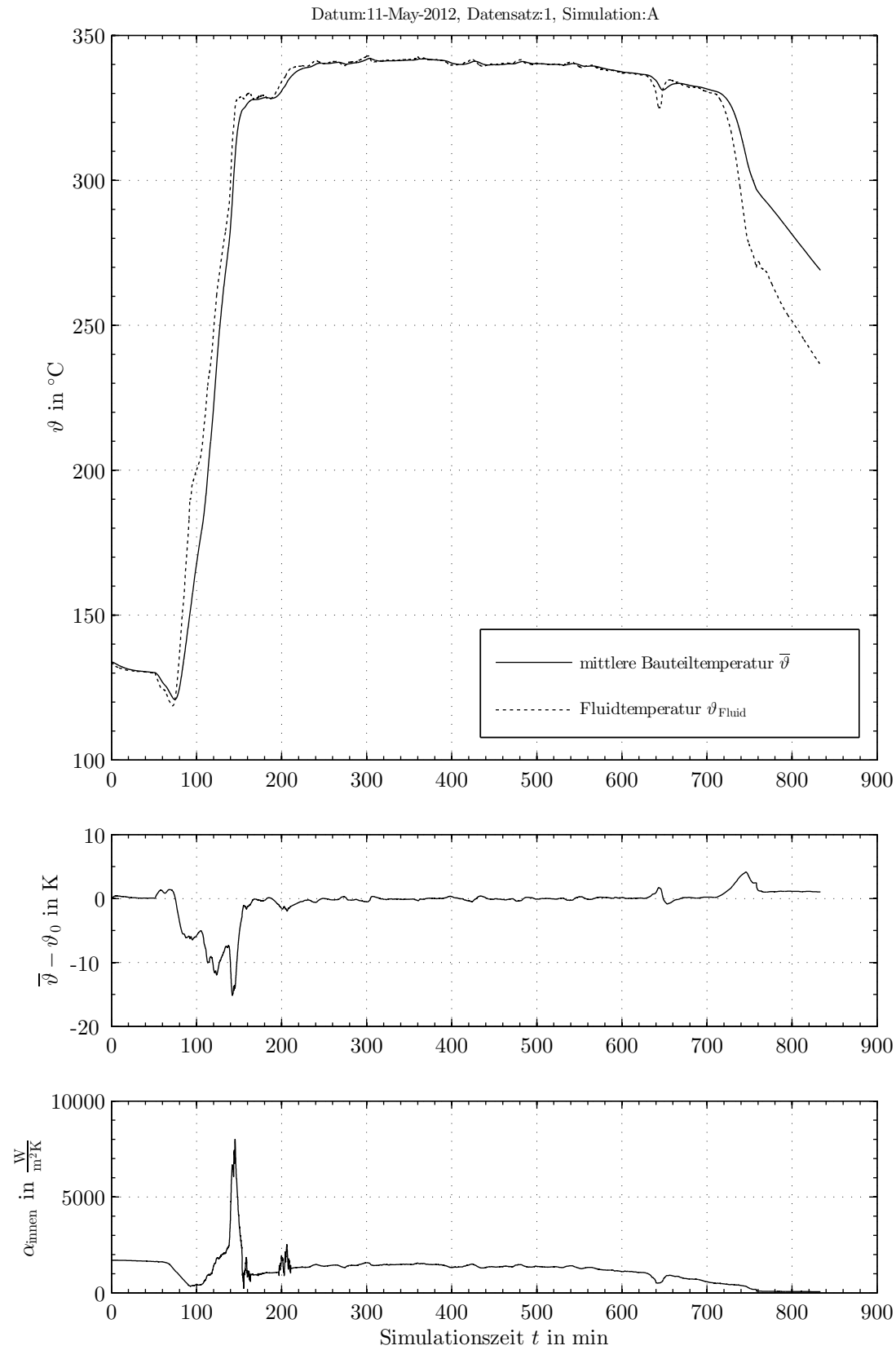
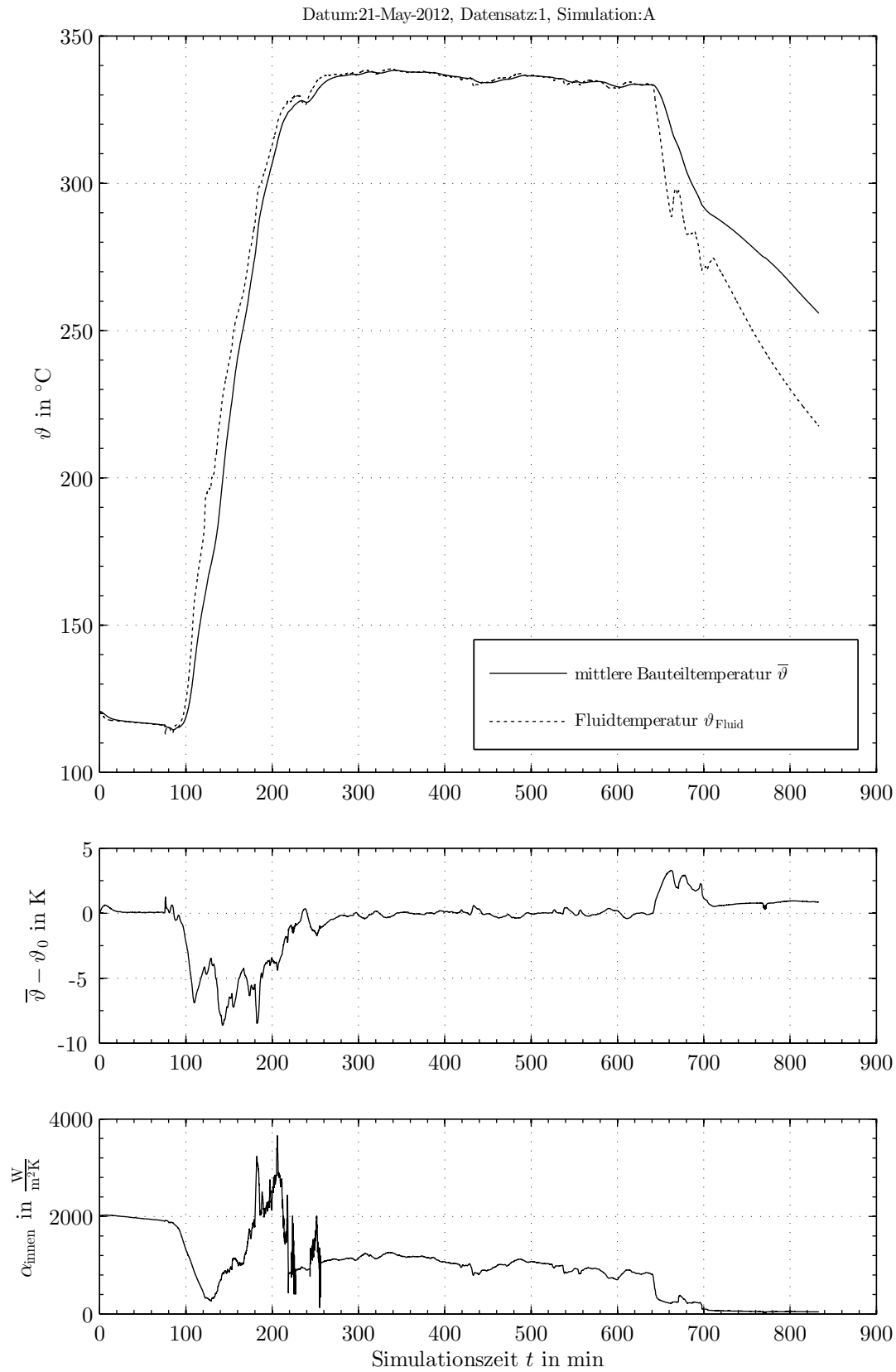
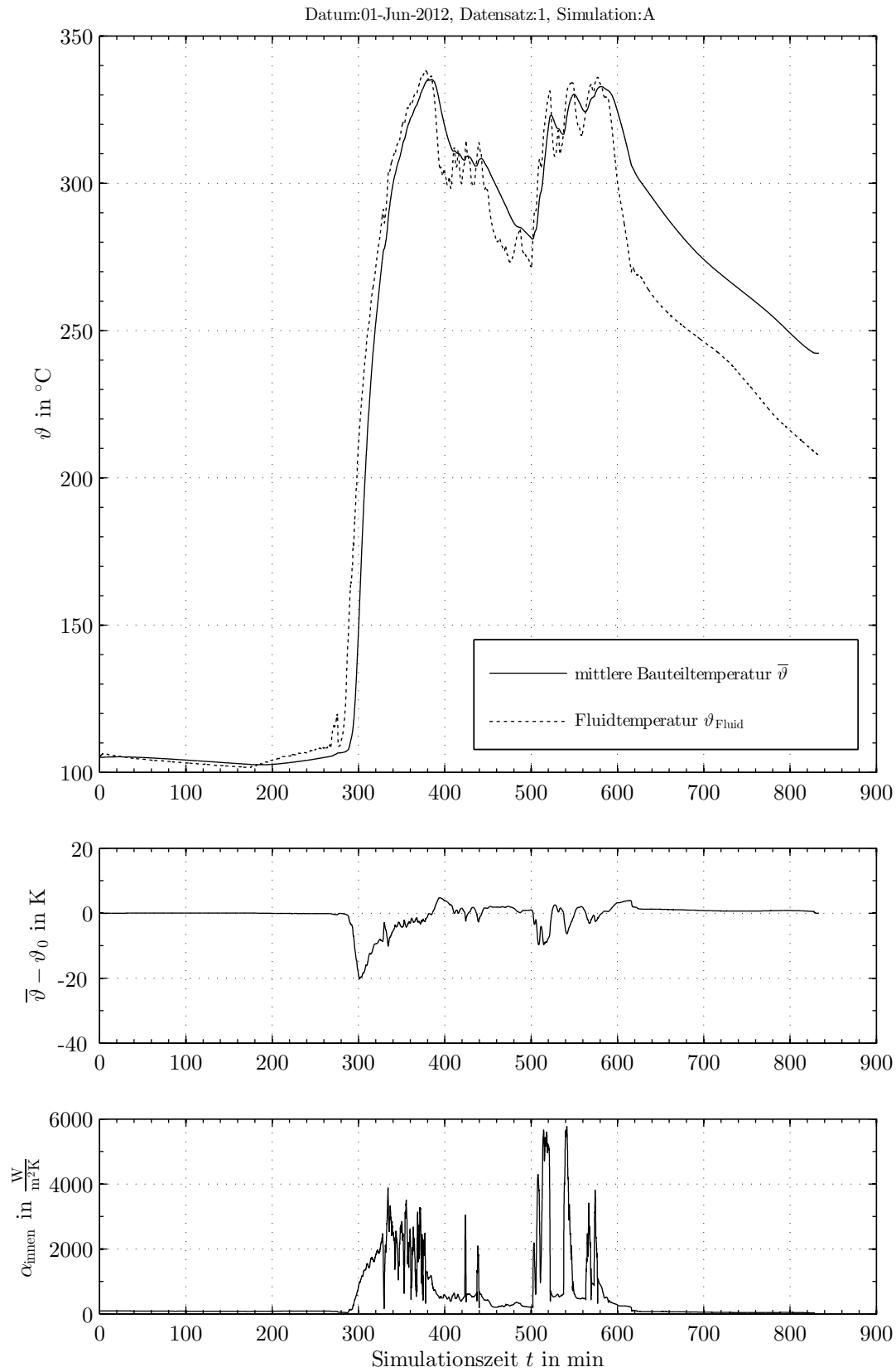


Bild E-4: Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (01.05.2012)

**Bild E-5:** Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (11.05.2012)

**Bild E-6:** Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (21.05.2012)

**Bild E-7:** Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (01.06.2012)

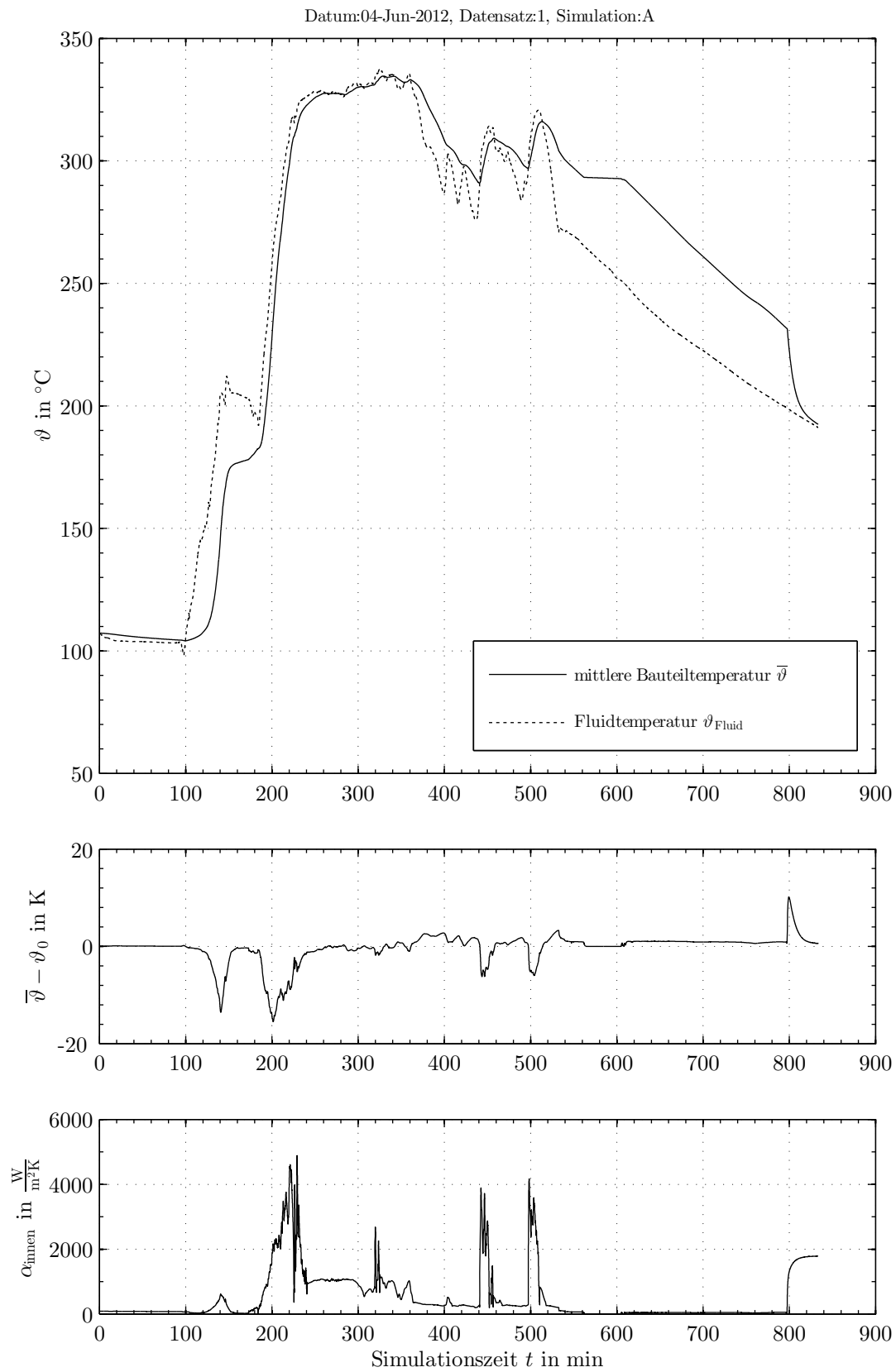


Bild E-8: Simulationsergebnis für die Dampftrommel, Skalierung: DT1 (04.06.2012)

E.3 Überhitzersammler 1. Strang

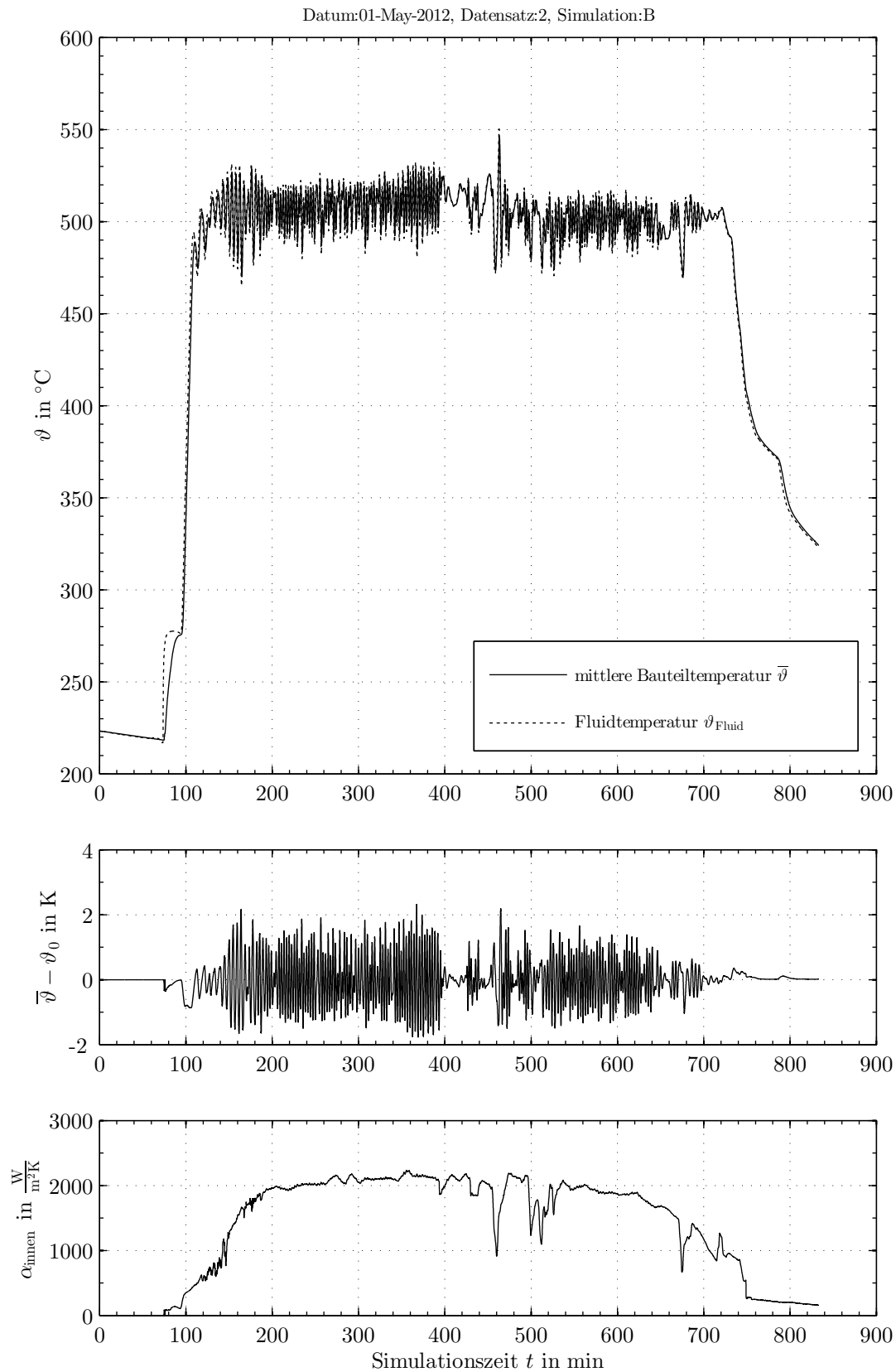


Bild E-9: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (01.05.2012)

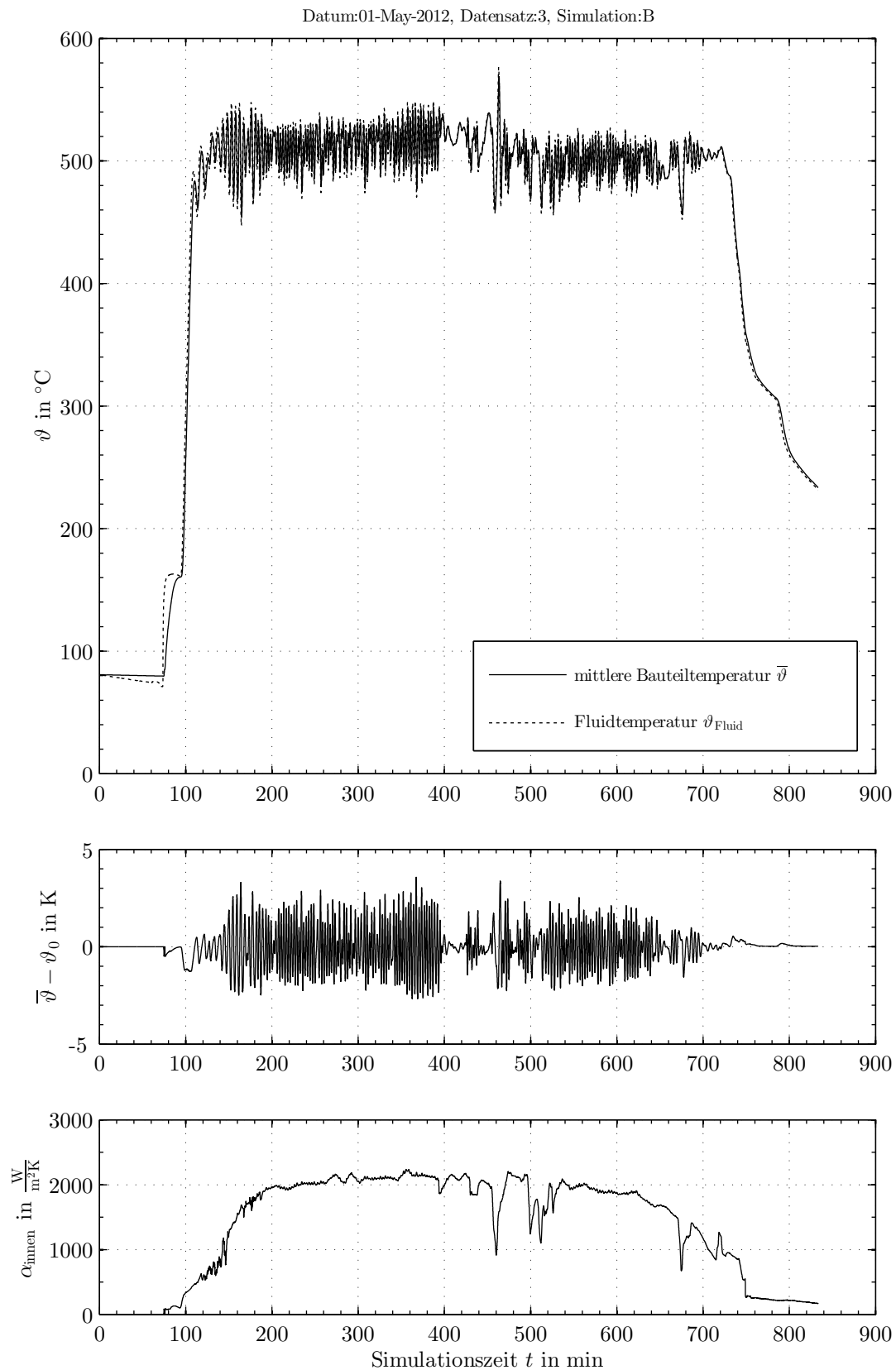


Bild E-10: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (01.05.2012)

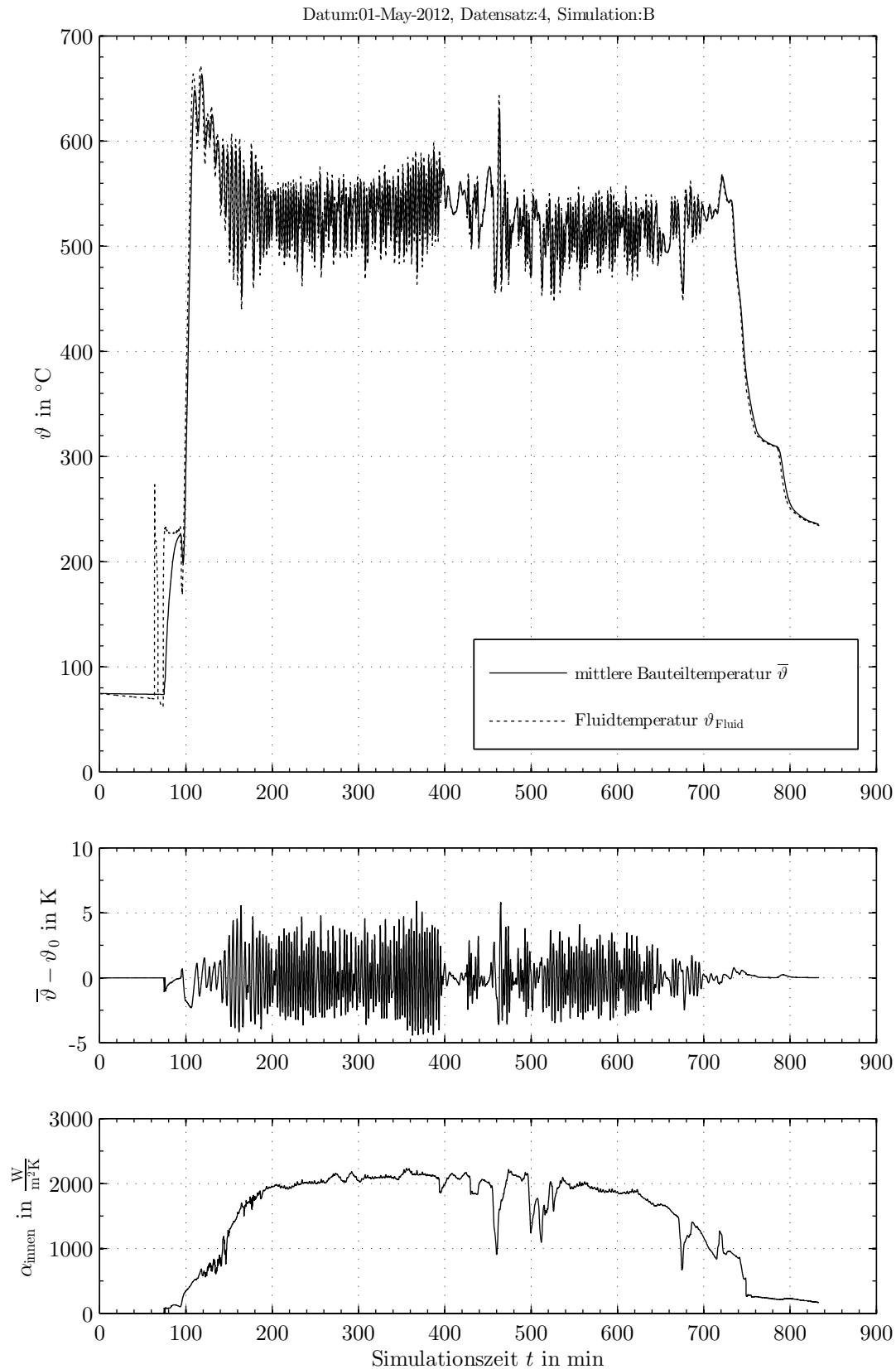


Bild E-11: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (01.05.2012)

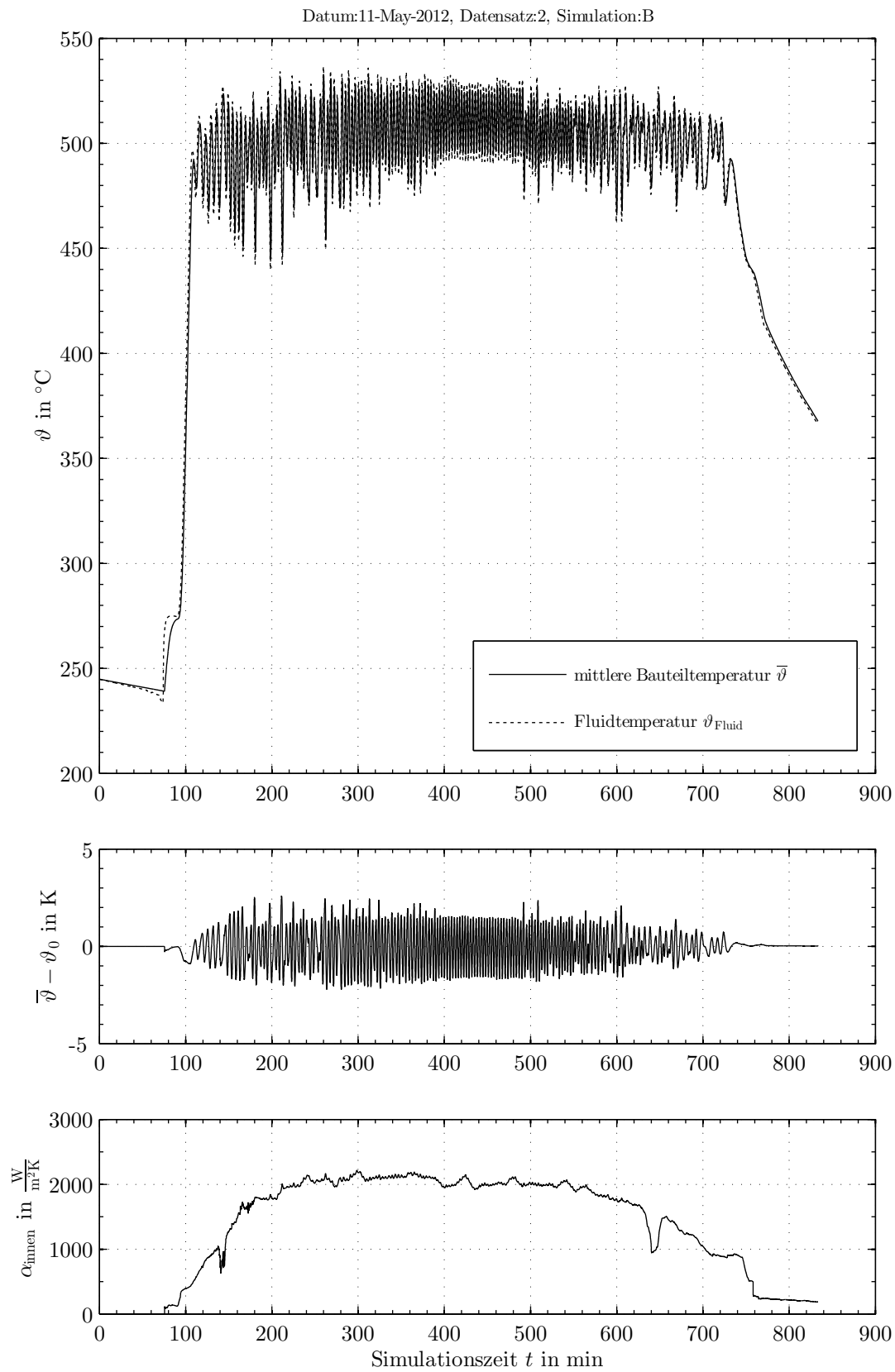


Bild E-12: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (11.05.2012)

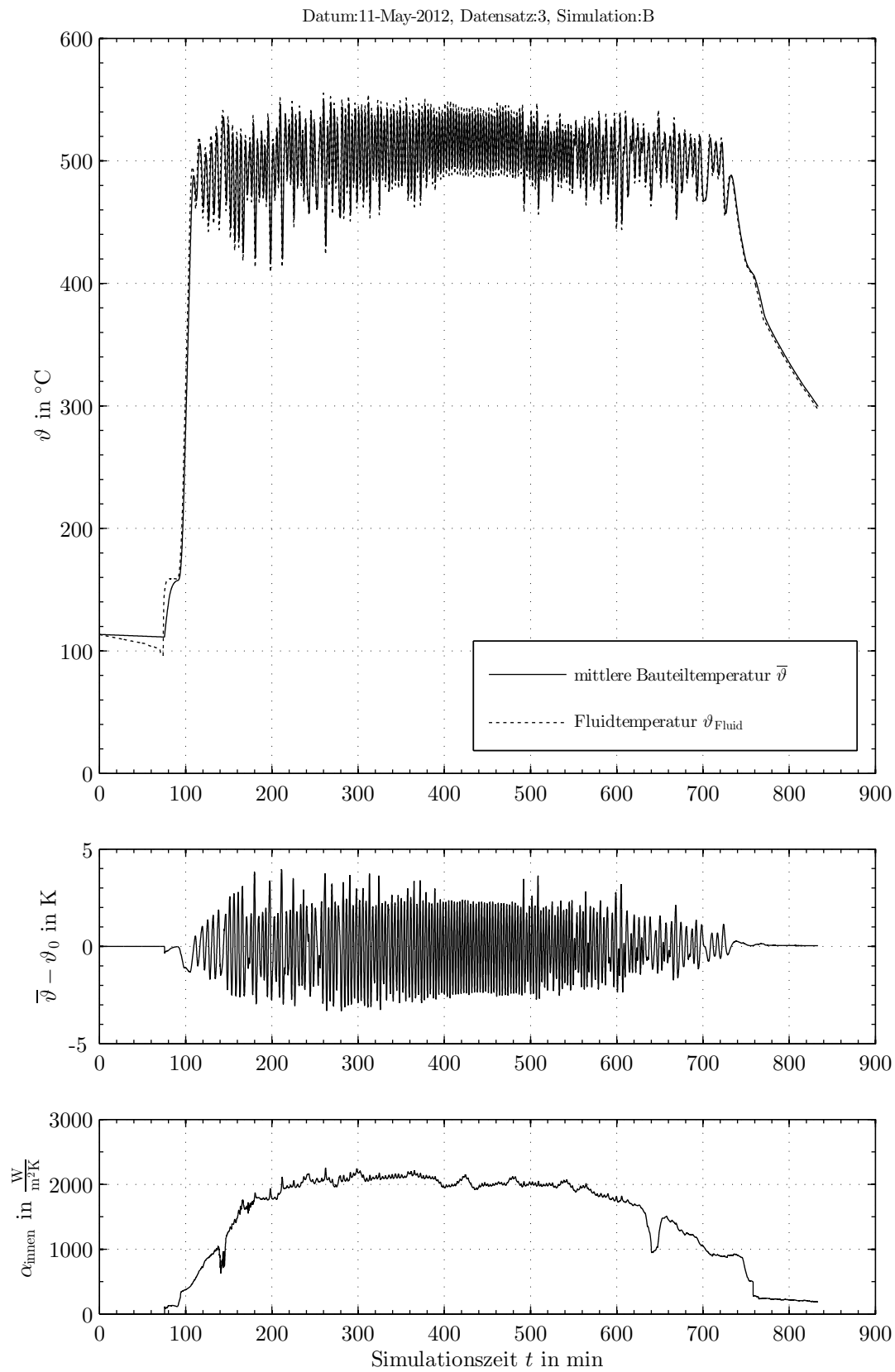


Bild E-13: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (11.05.2012)

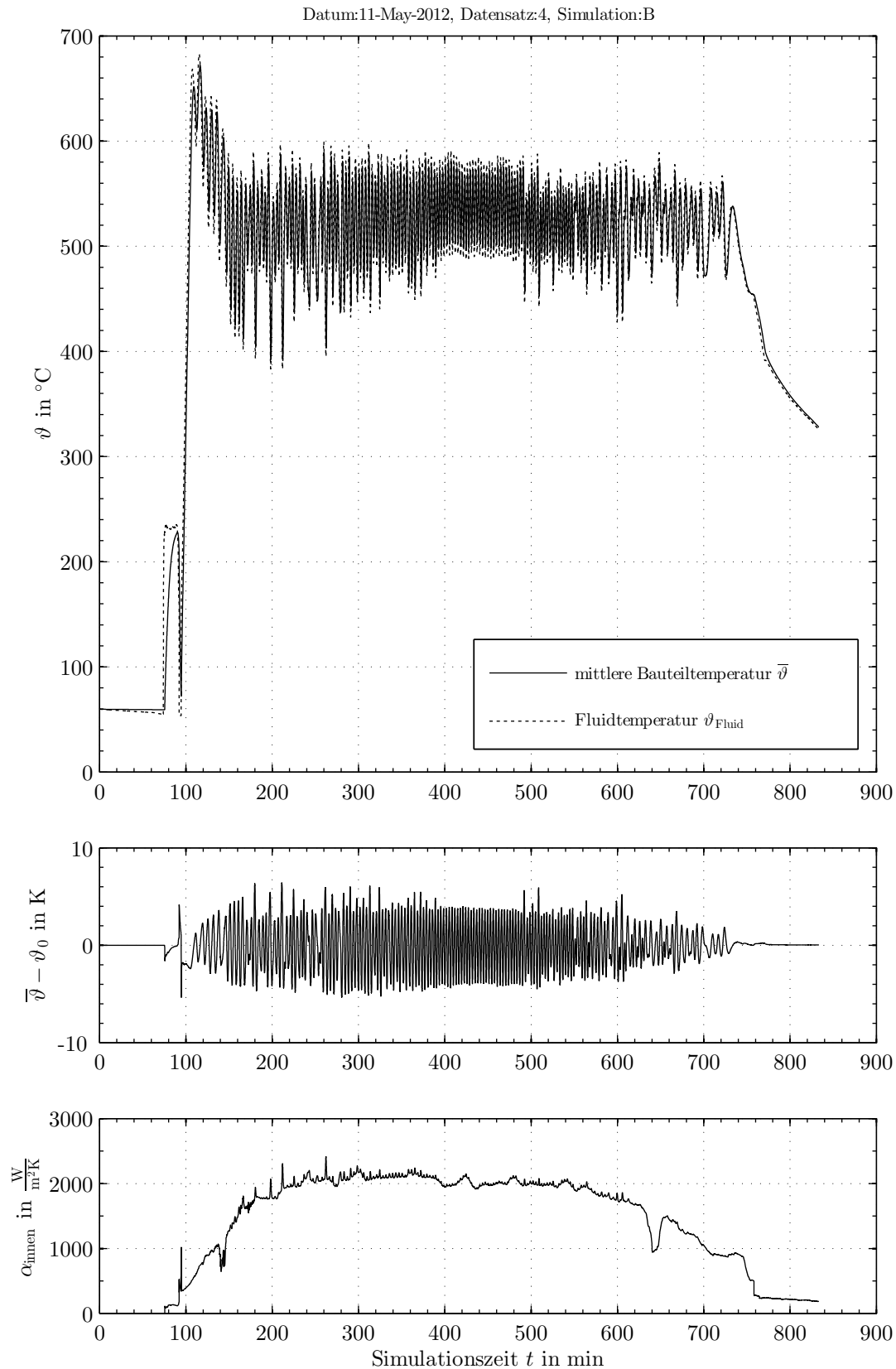


Bild E-14: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (11.05.2012)

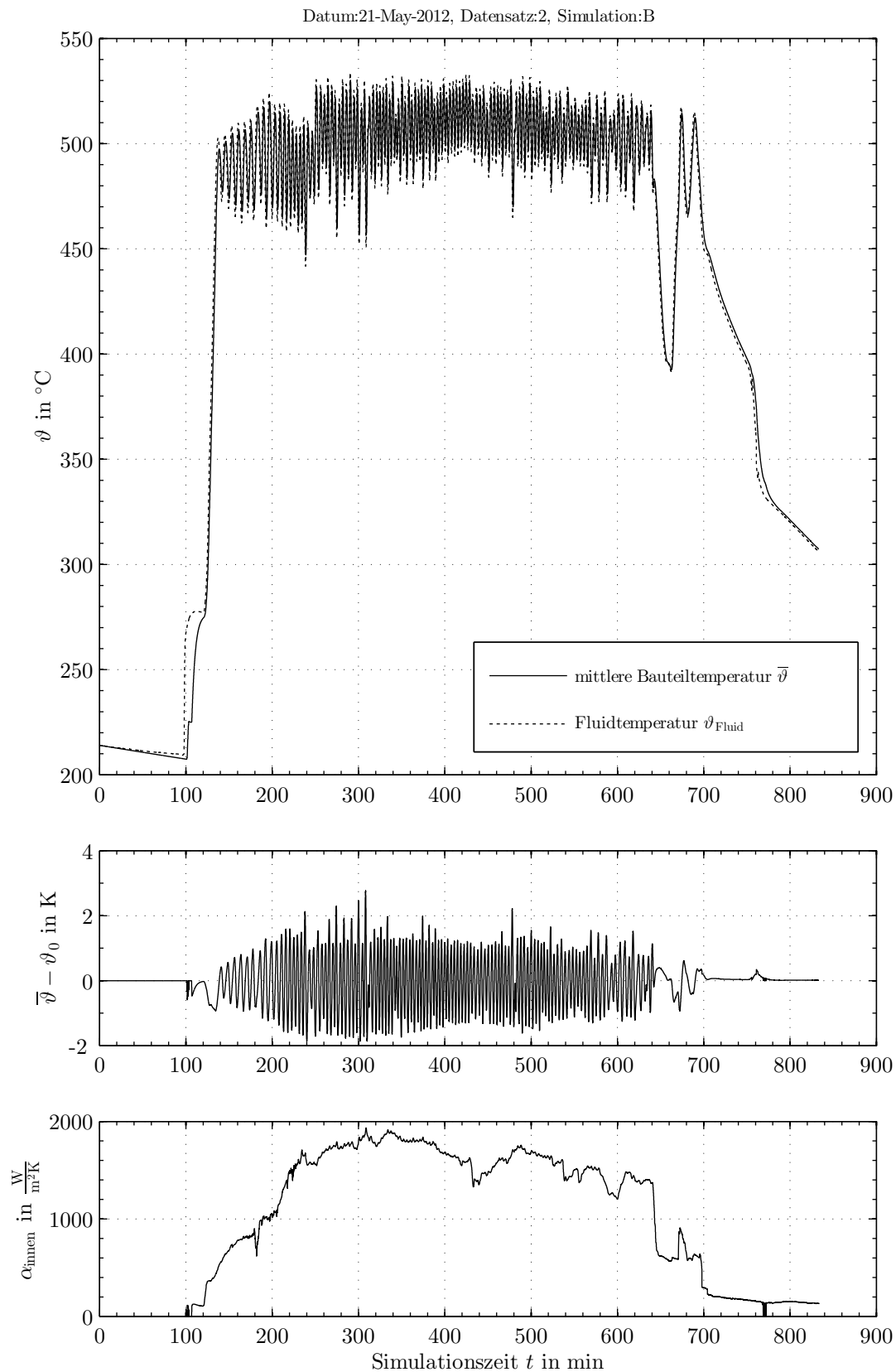


Bild E-15: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (21.05.2012)

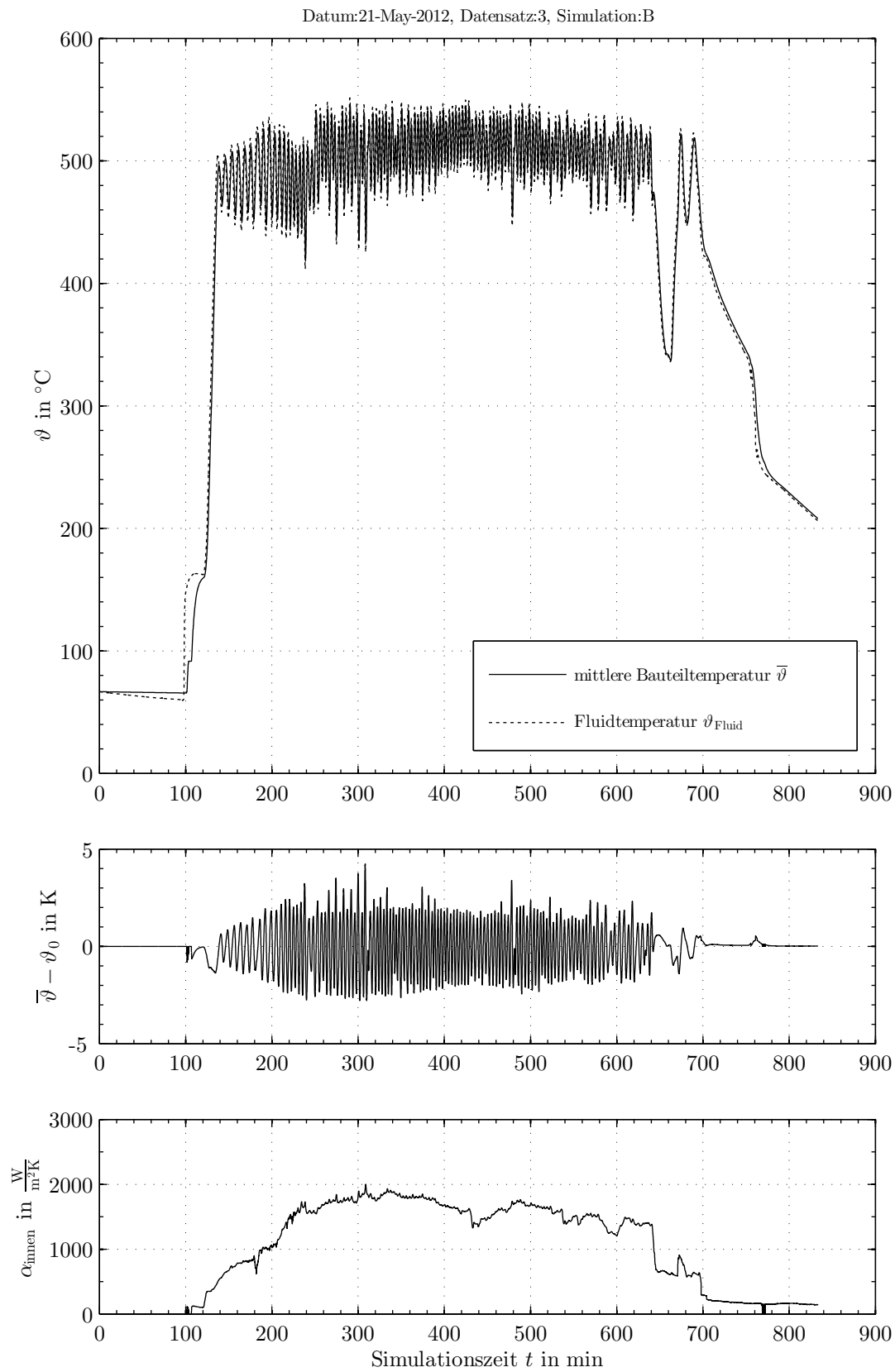


Bild E-16: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (21.05.2012)

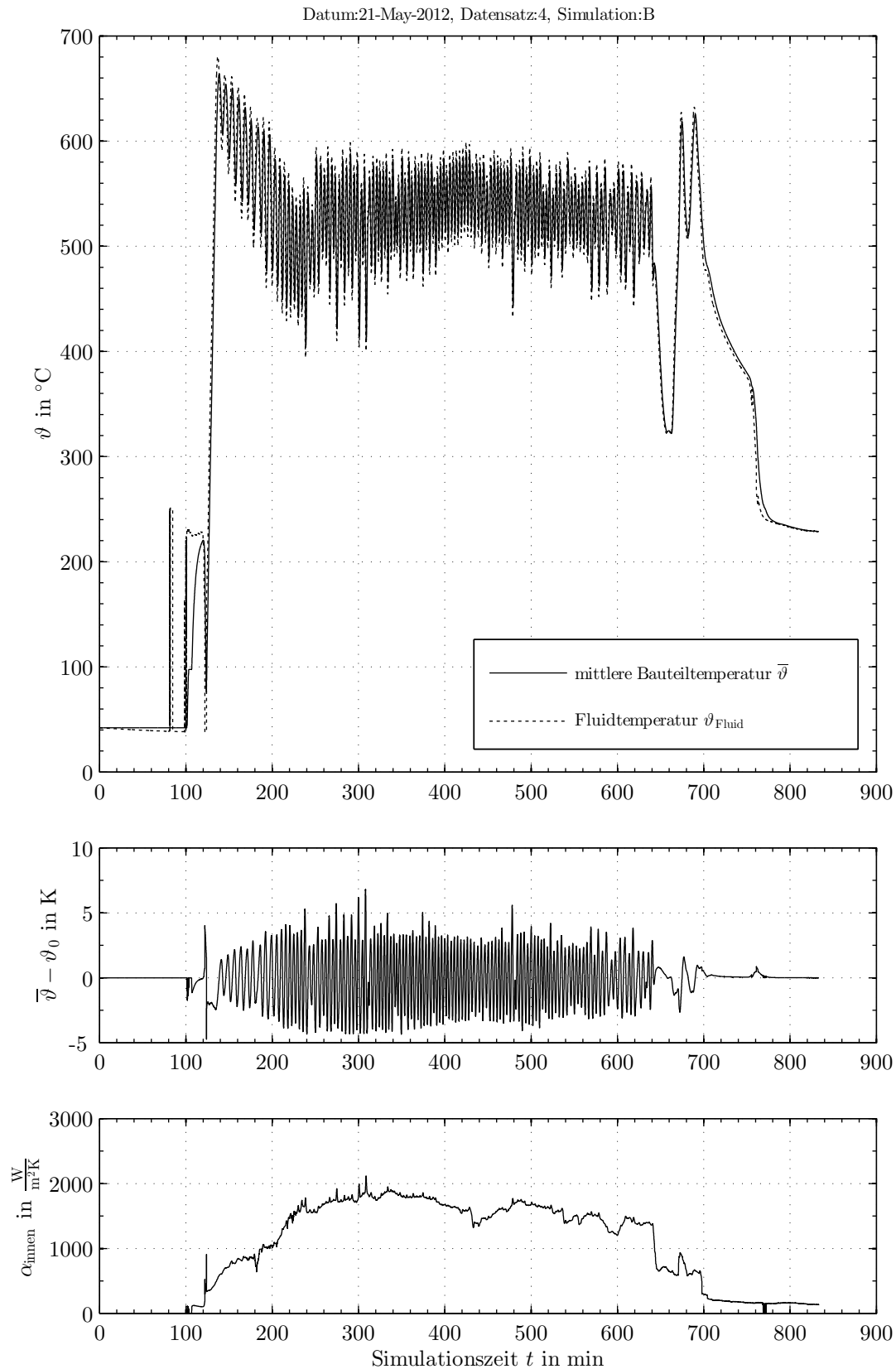


Bild E-17: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (21.05.2012)

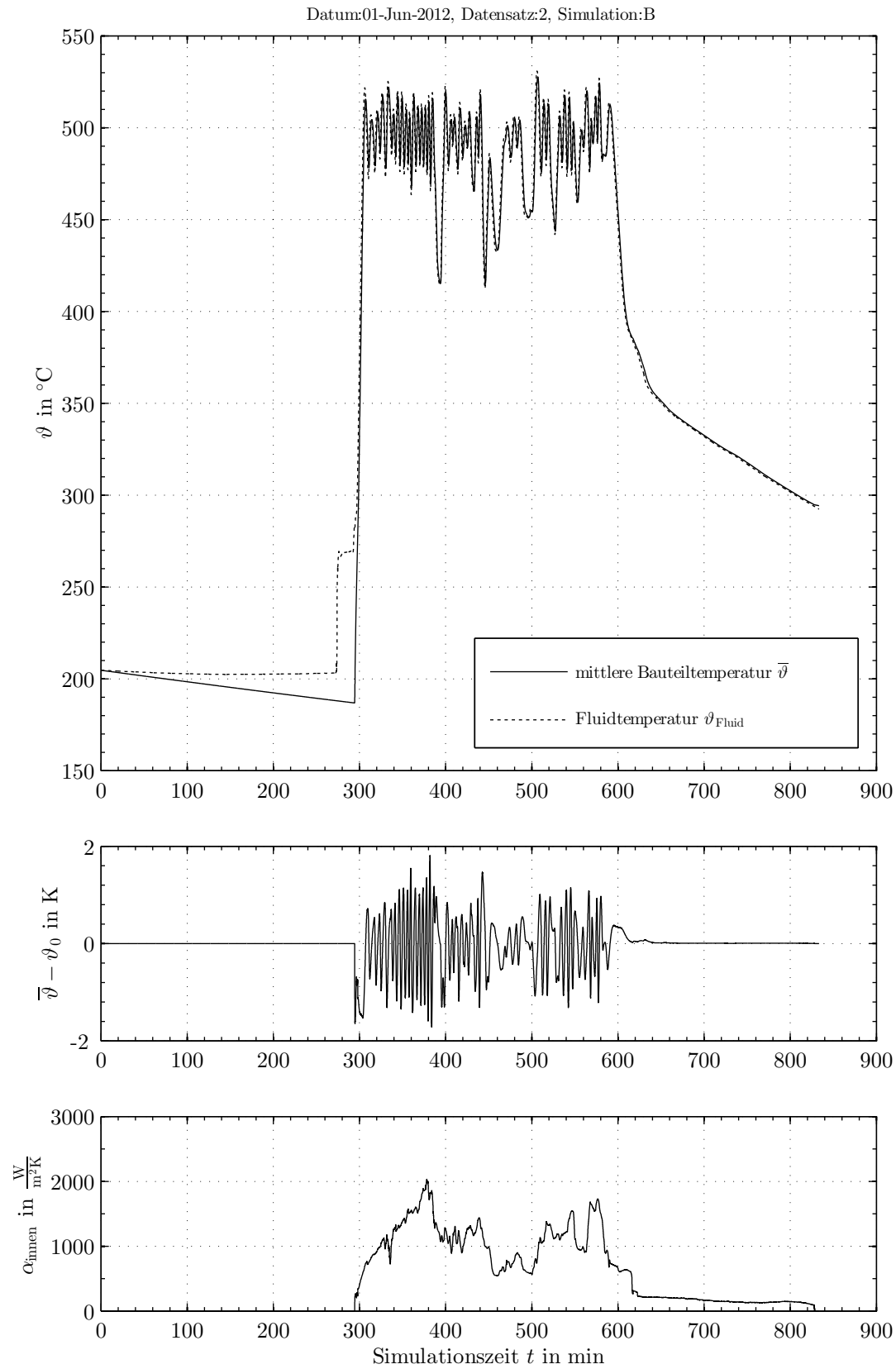


Bild E-18: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (01.06.2012)

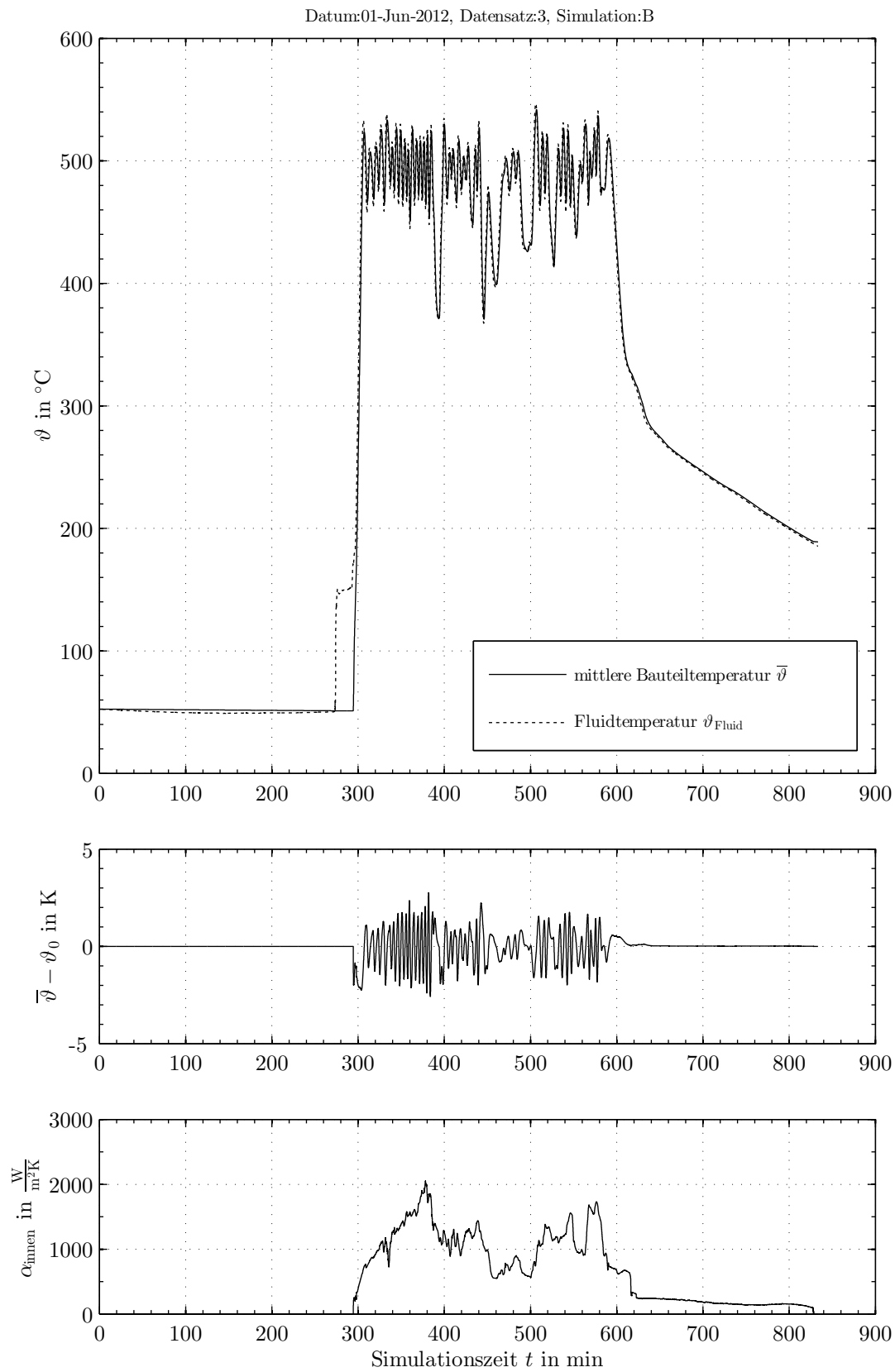


Bild E-19: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (01.06.2012)

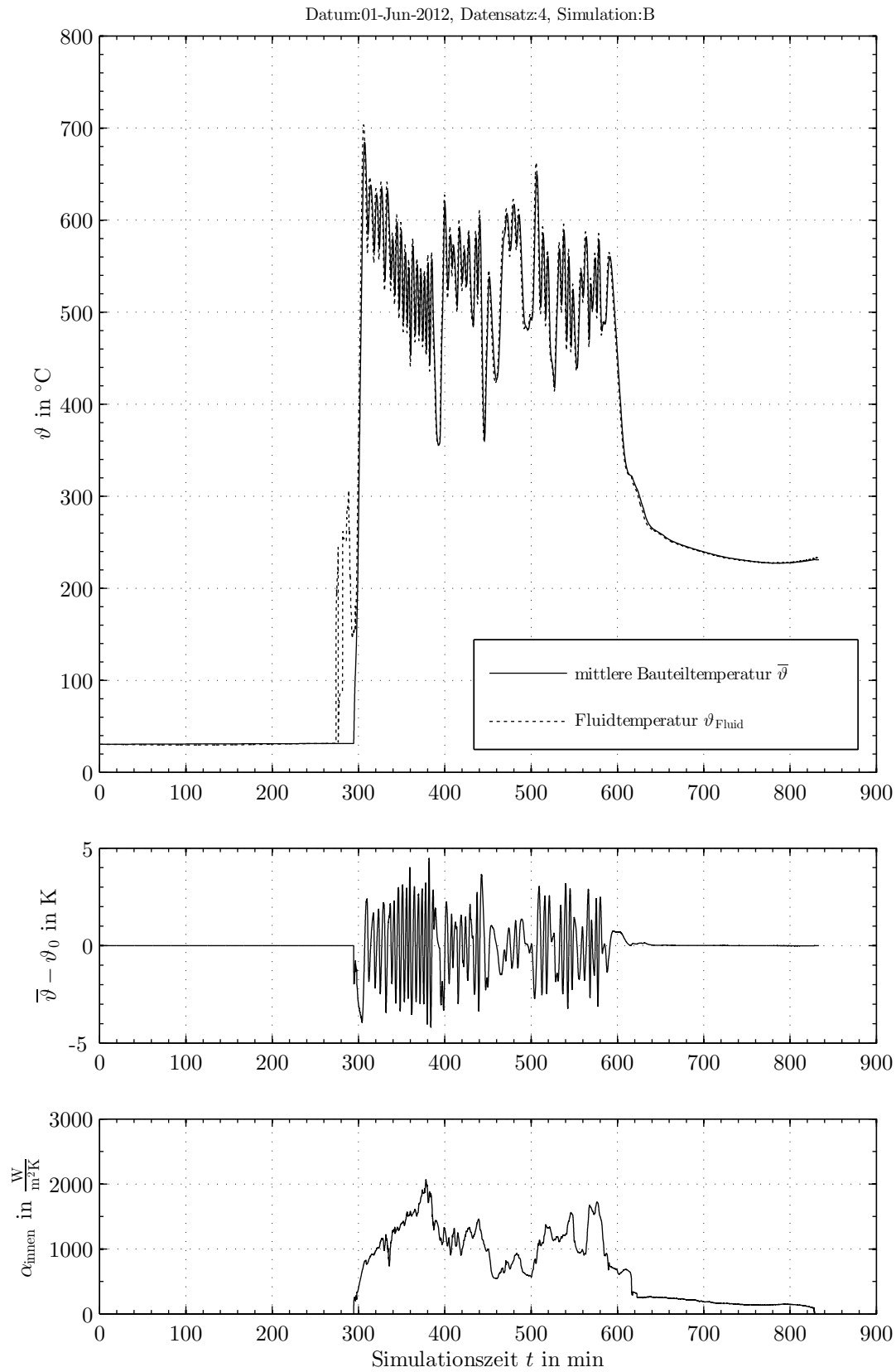


Bild E-20: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (01.06.2012)

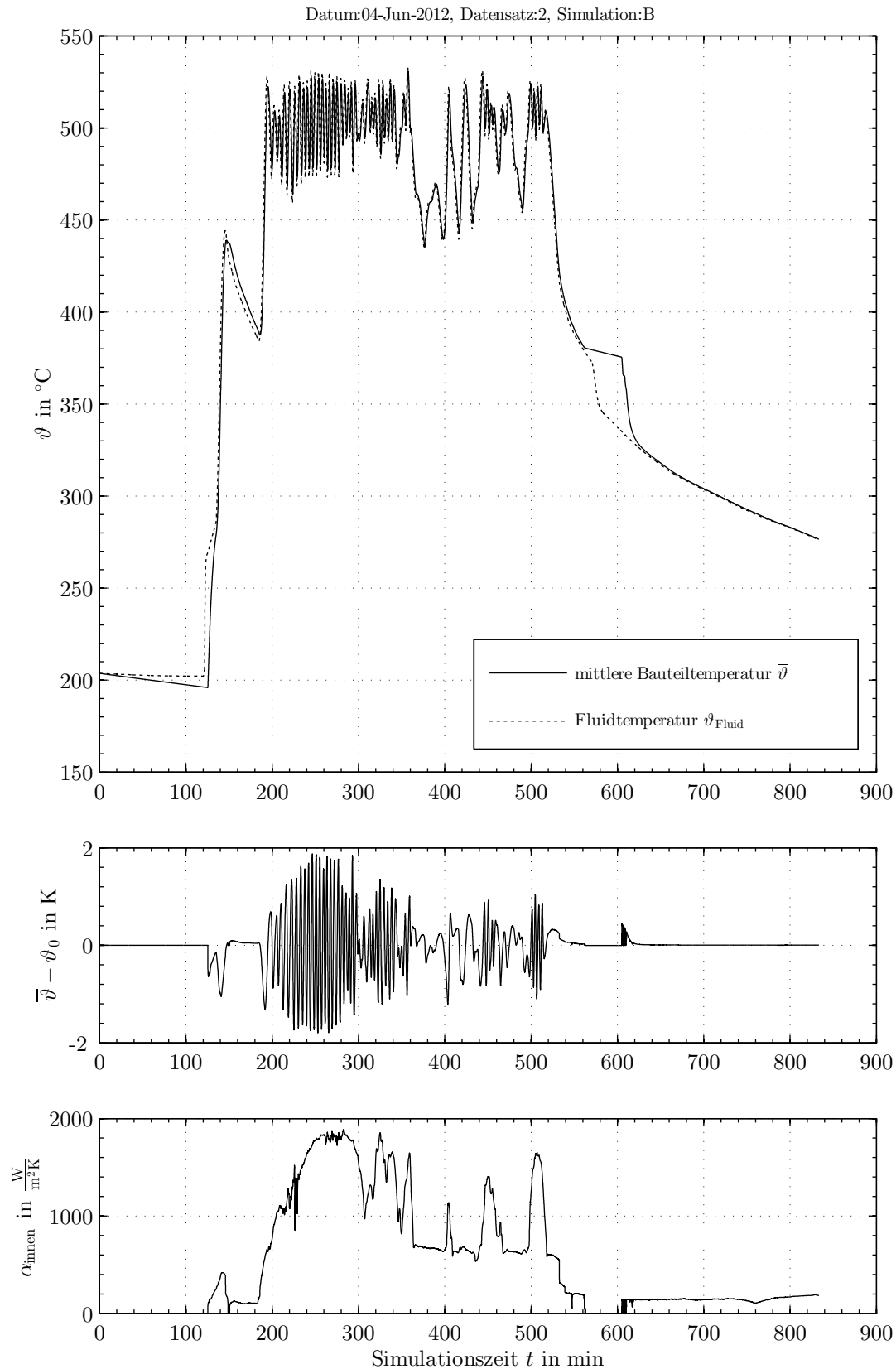


Bild E-21: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH1 (04.06.2012)

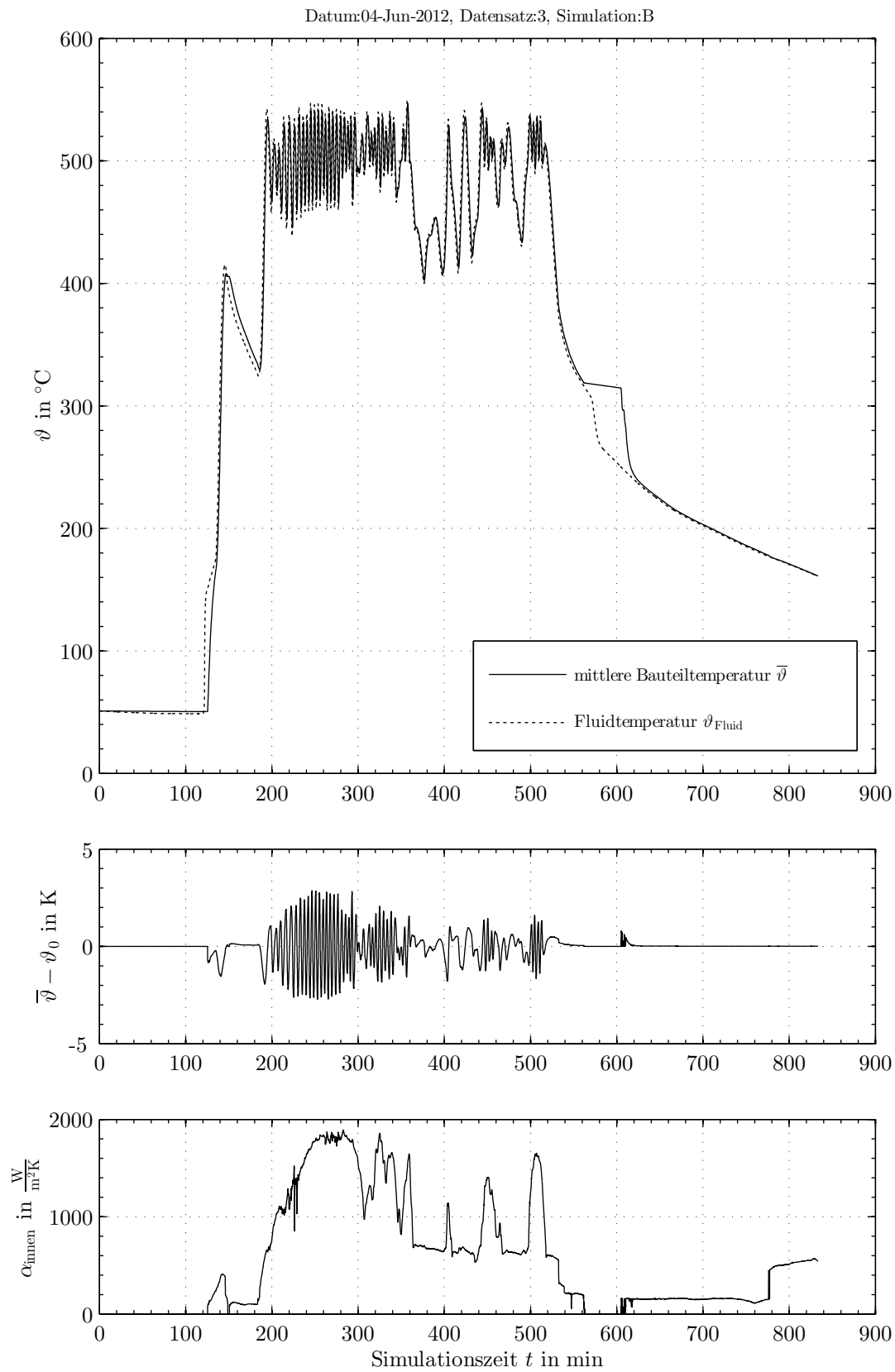


Bild E-22: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH2 (04.06.2012)

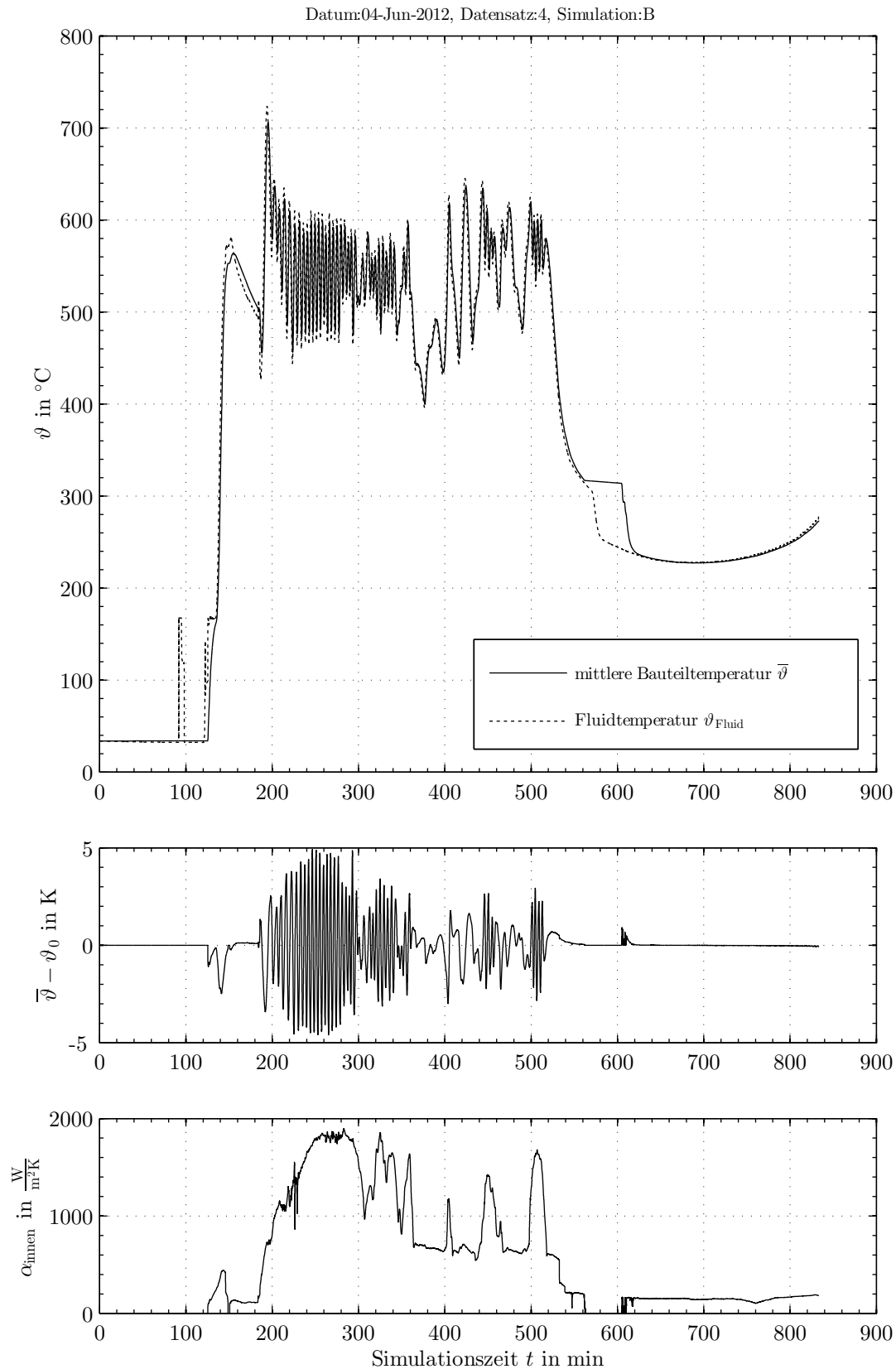


Bild E-23: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, 1. Strang, Skalierung: ÜH3 (04.06.2012)

E.4 Überhitzersammler letzter Strang

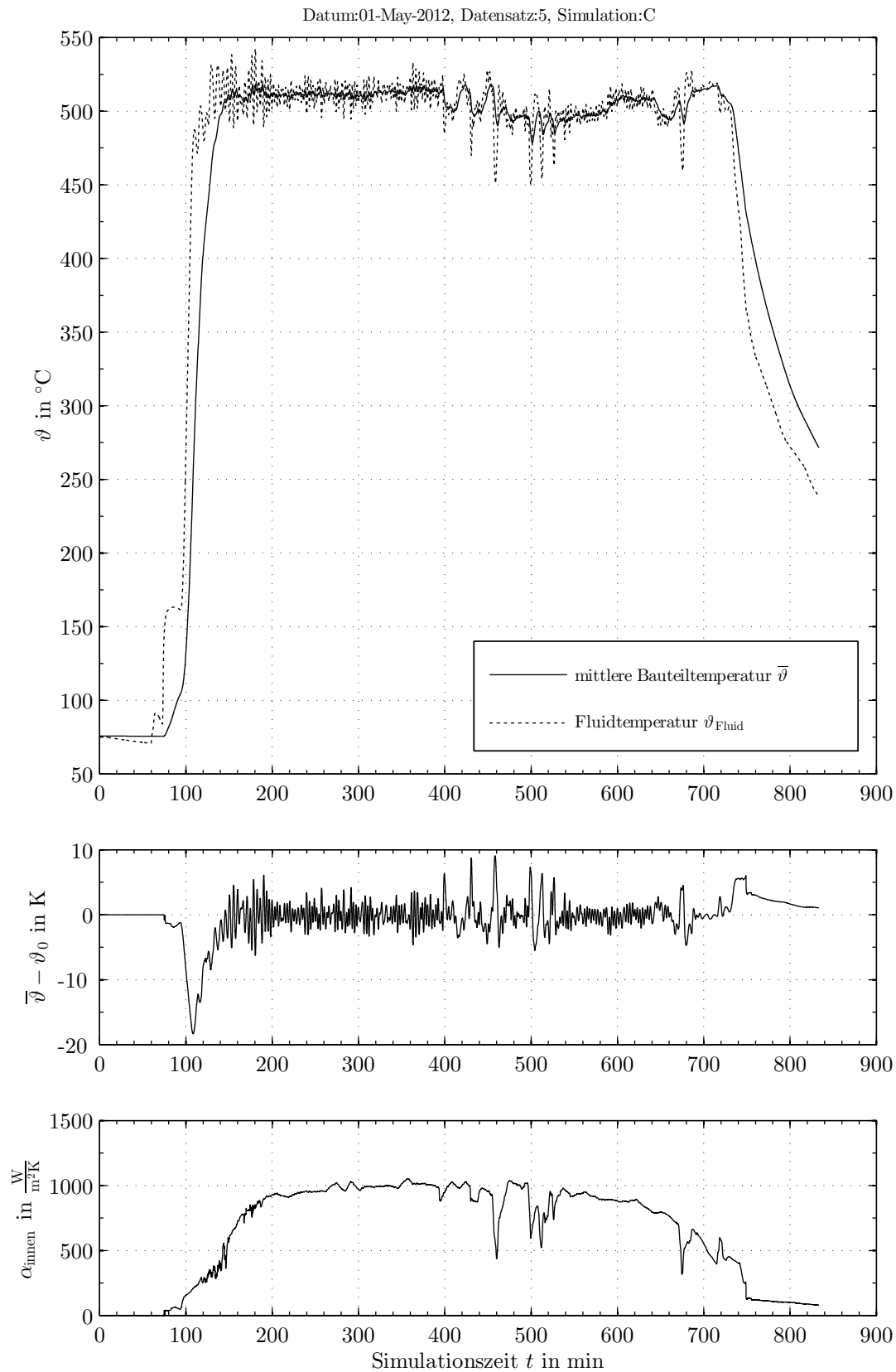


Bild E-24: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (01.05.2012)

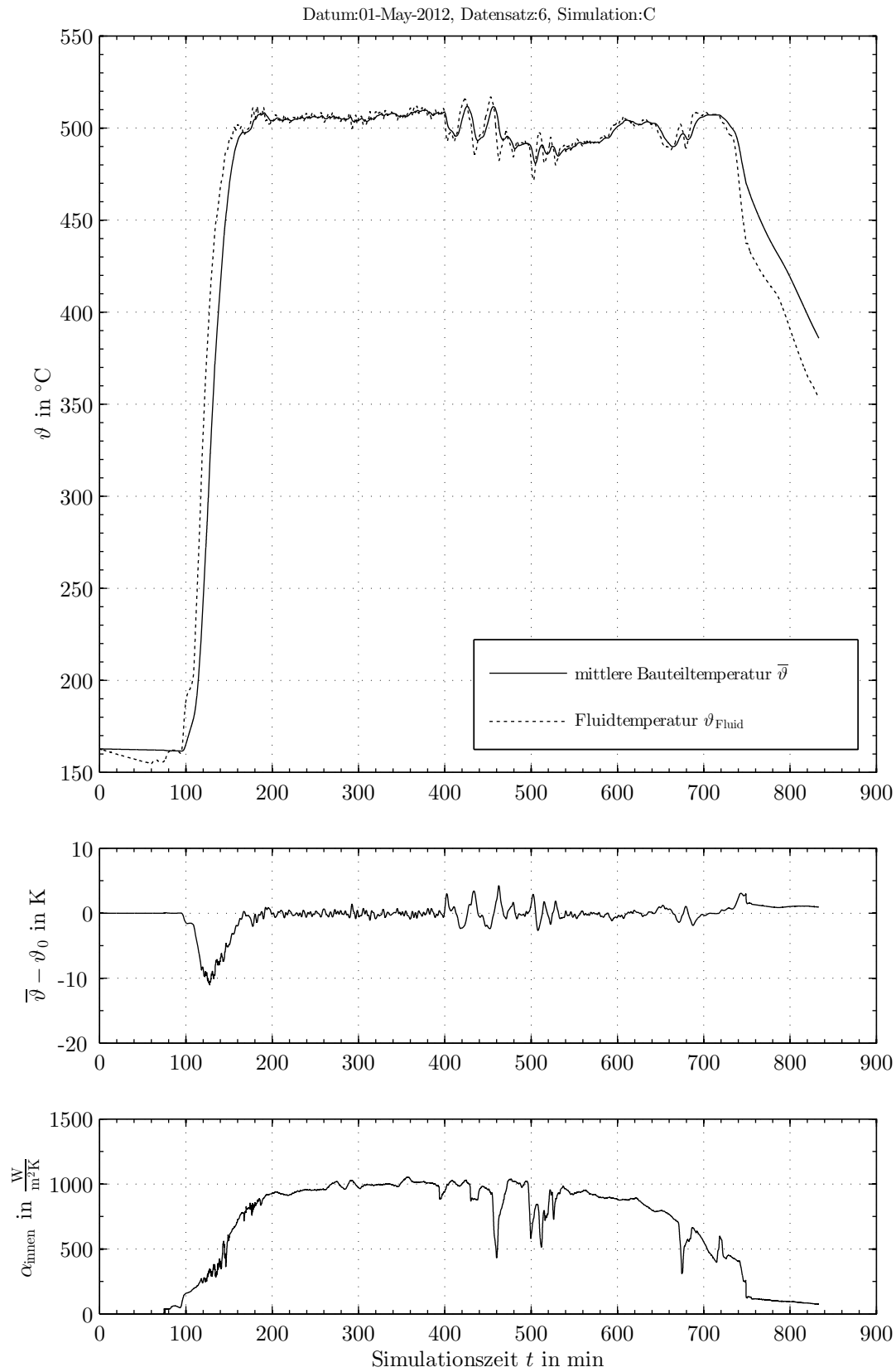


Bild E-25: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (01.05.2012)

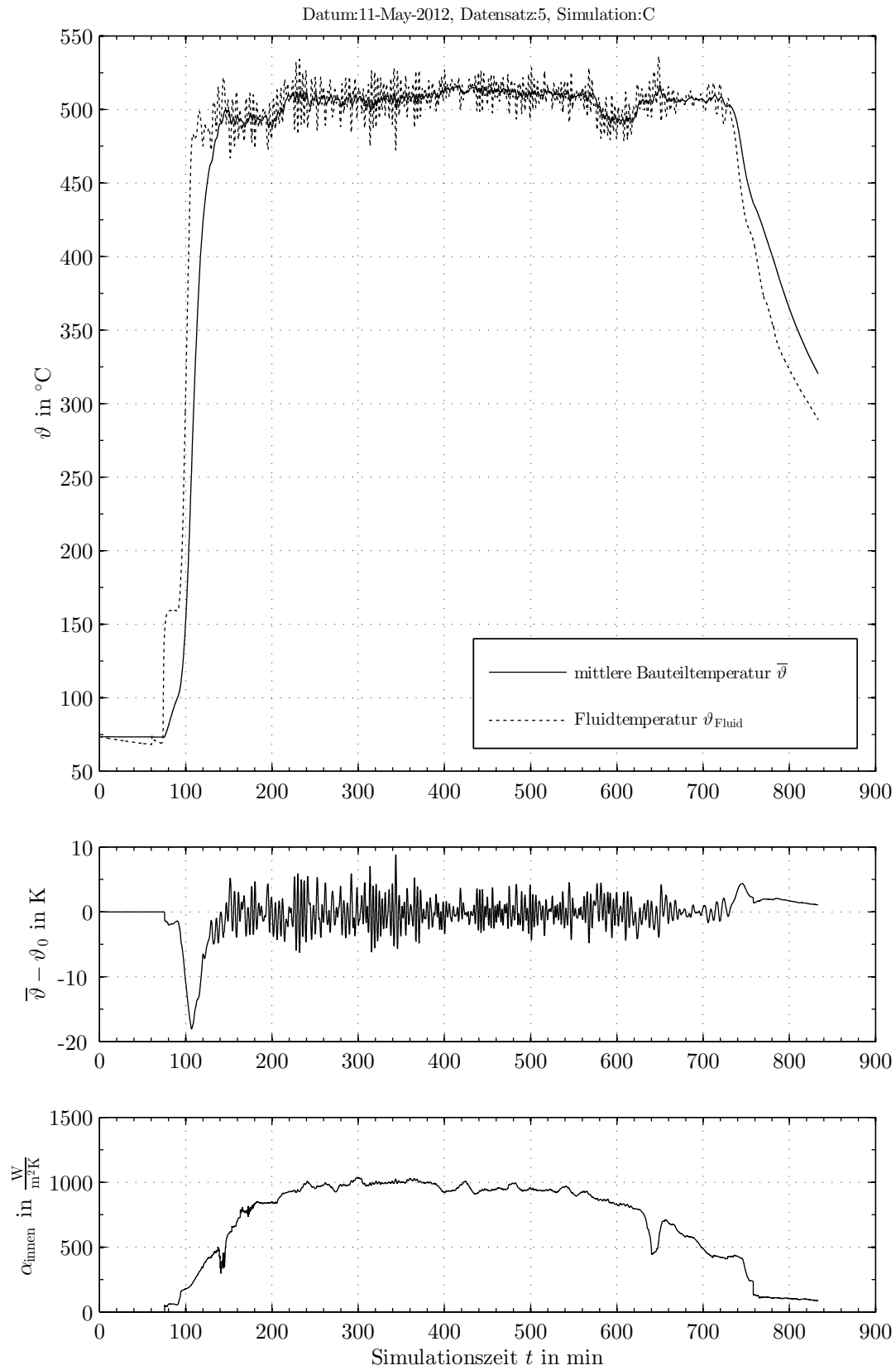


Bild E-26: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1
(11.05.2012)

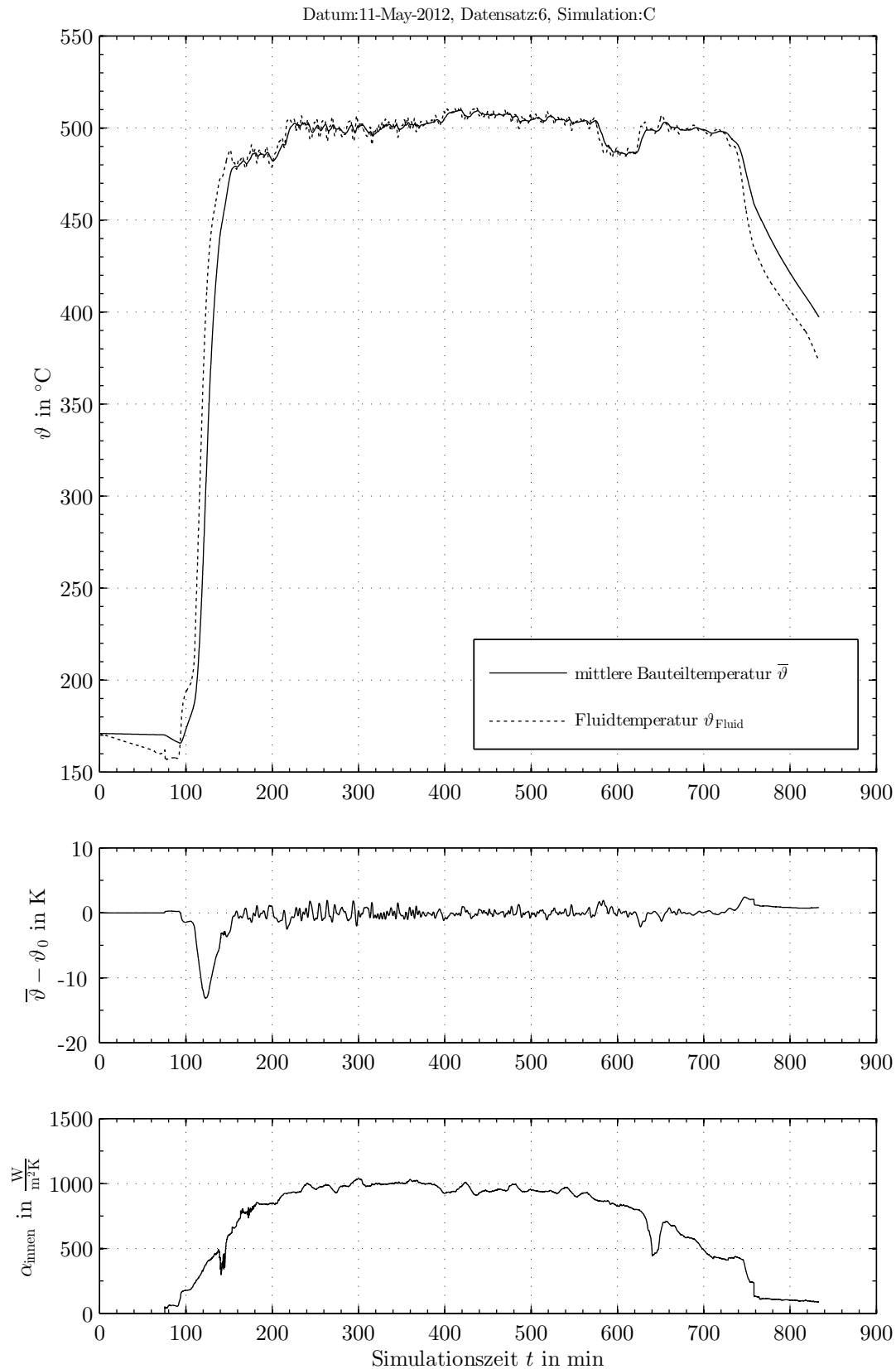


Bild E-27: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (11.05.2012)

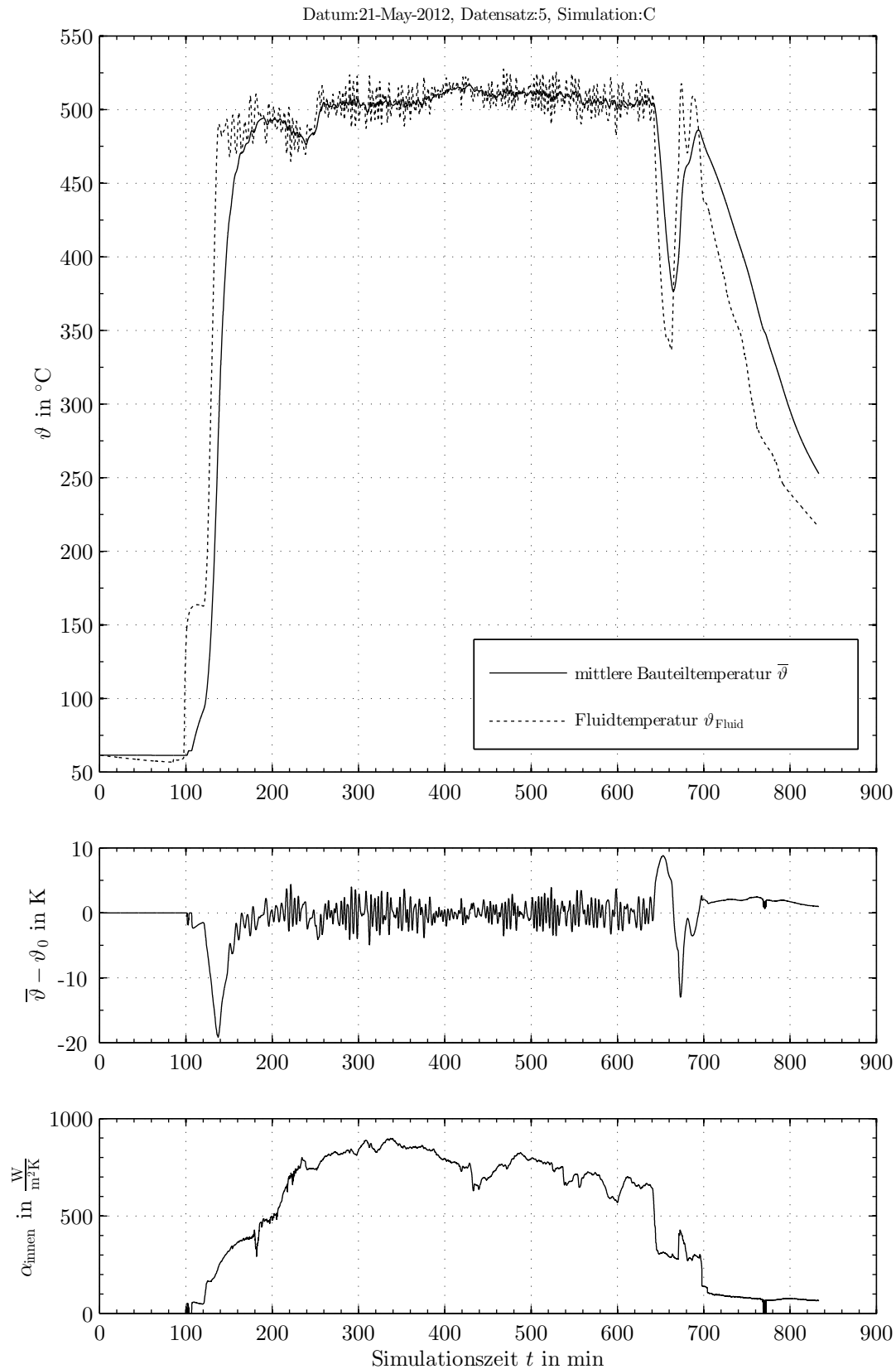


Bild E-28: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (21.05.2012)

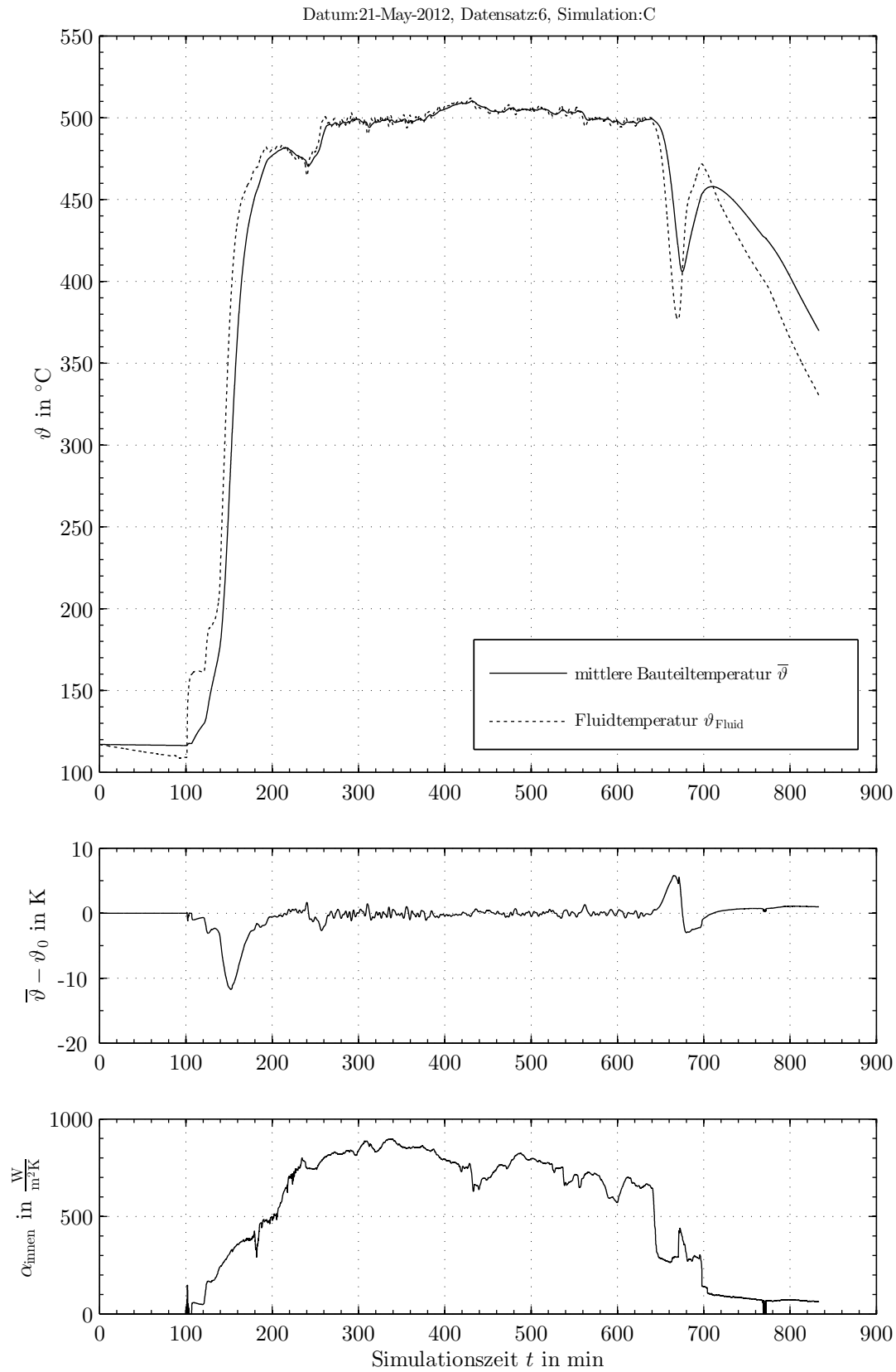


Bild E-29: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (21.05.2012)

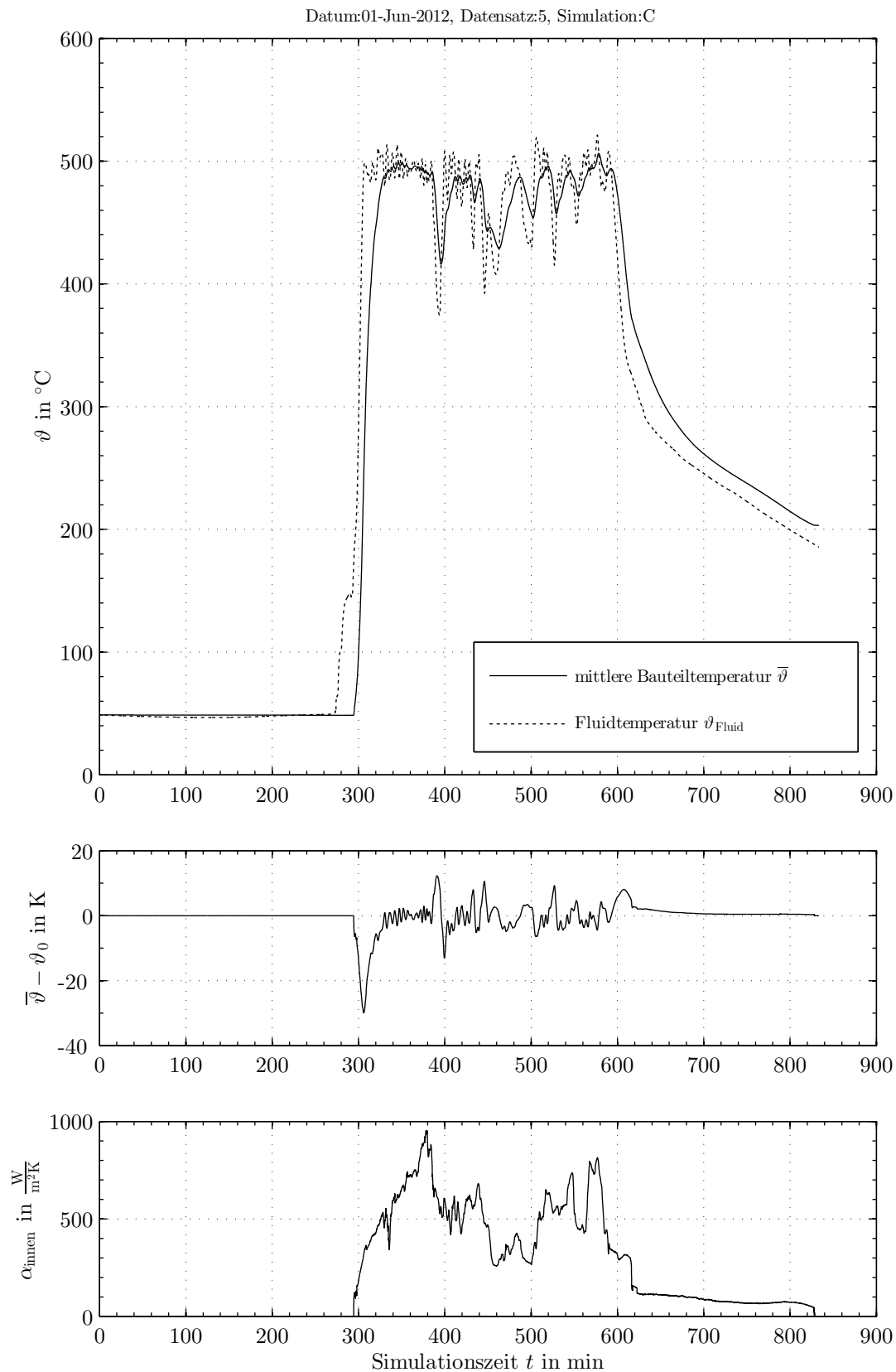


Bild E-30: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1 (01.06.2012)

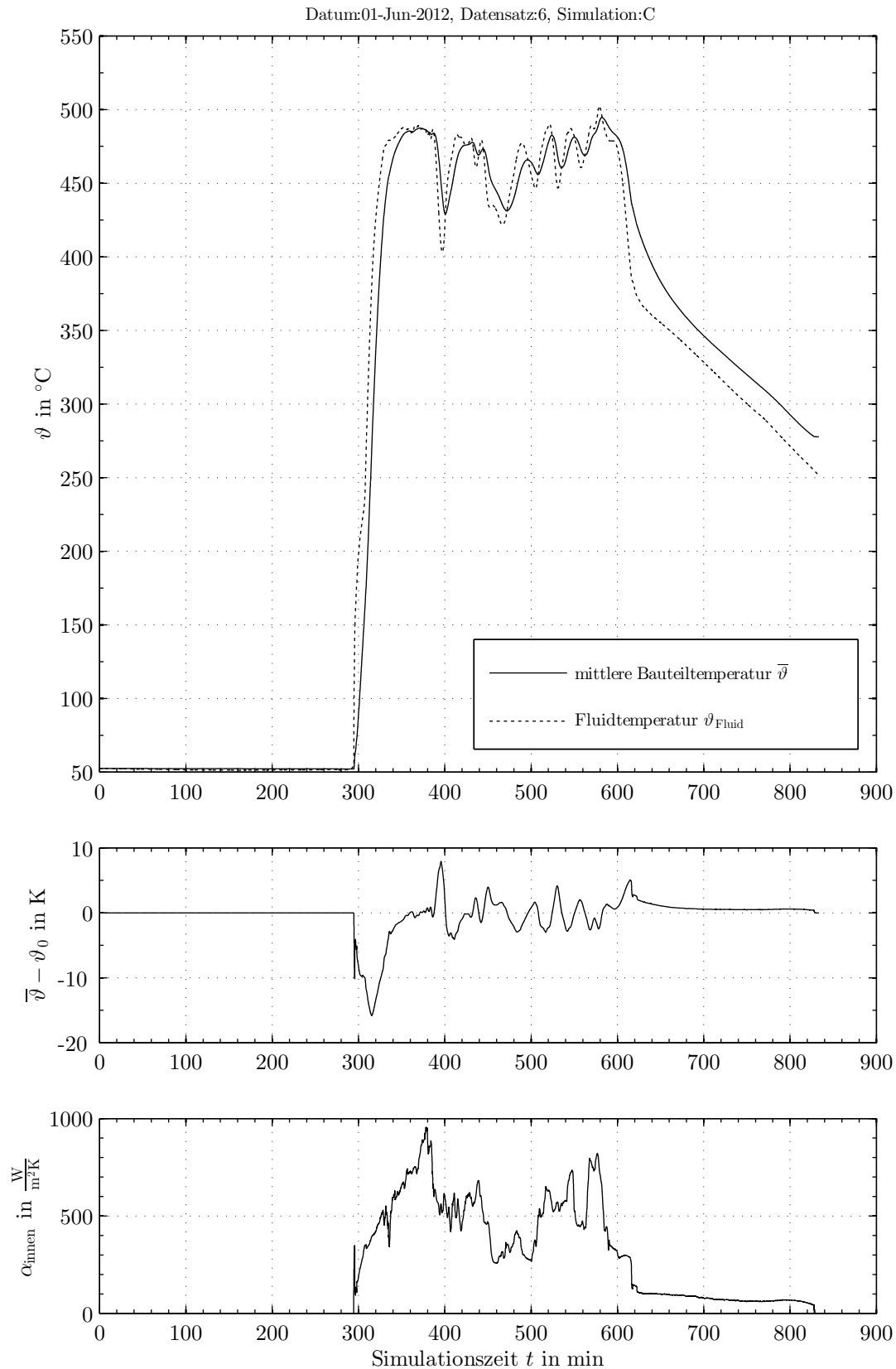


Bild E-31: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2 (01.06.2012)

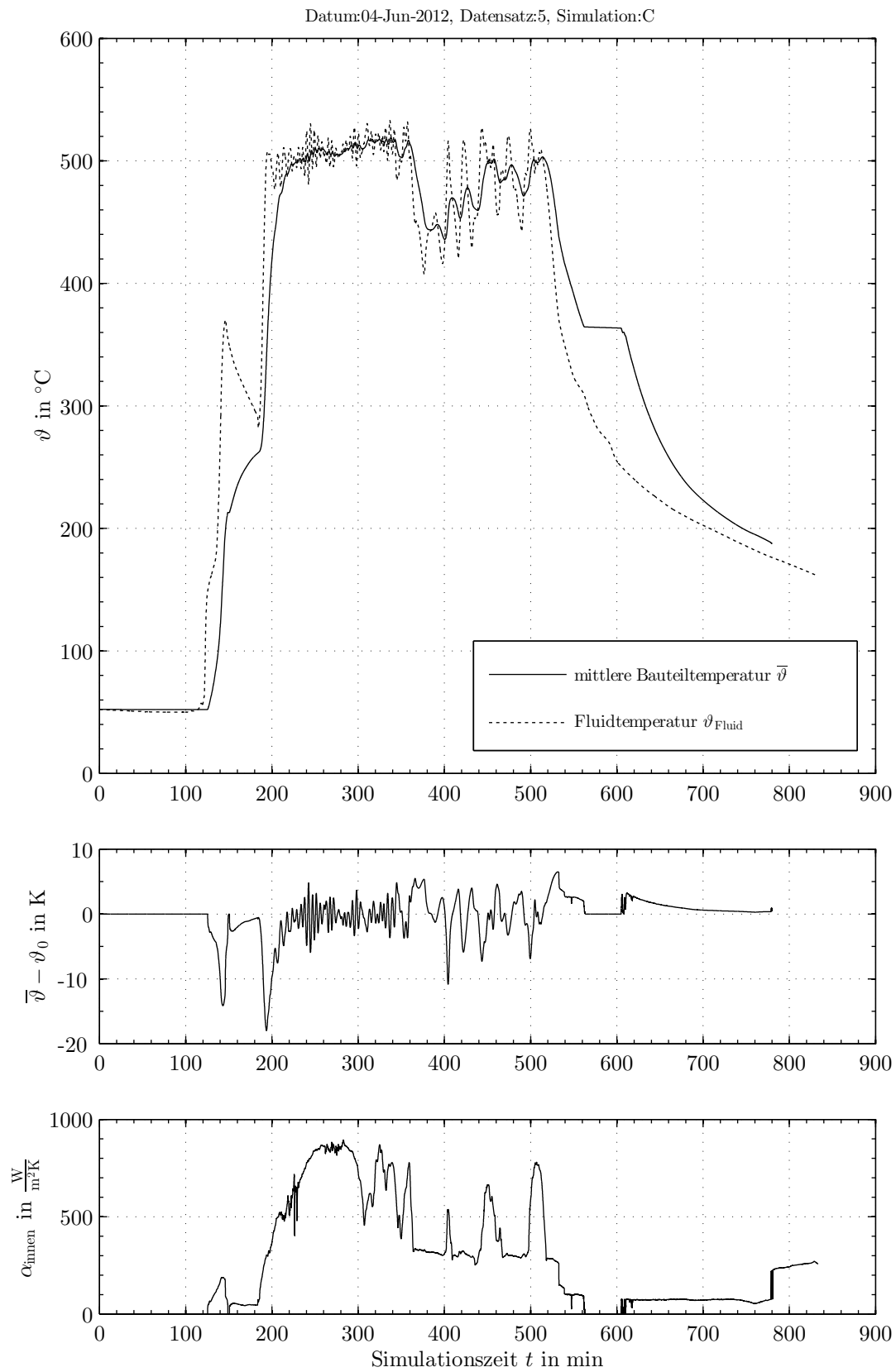


Bild E-32: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1
(04.06.2012)

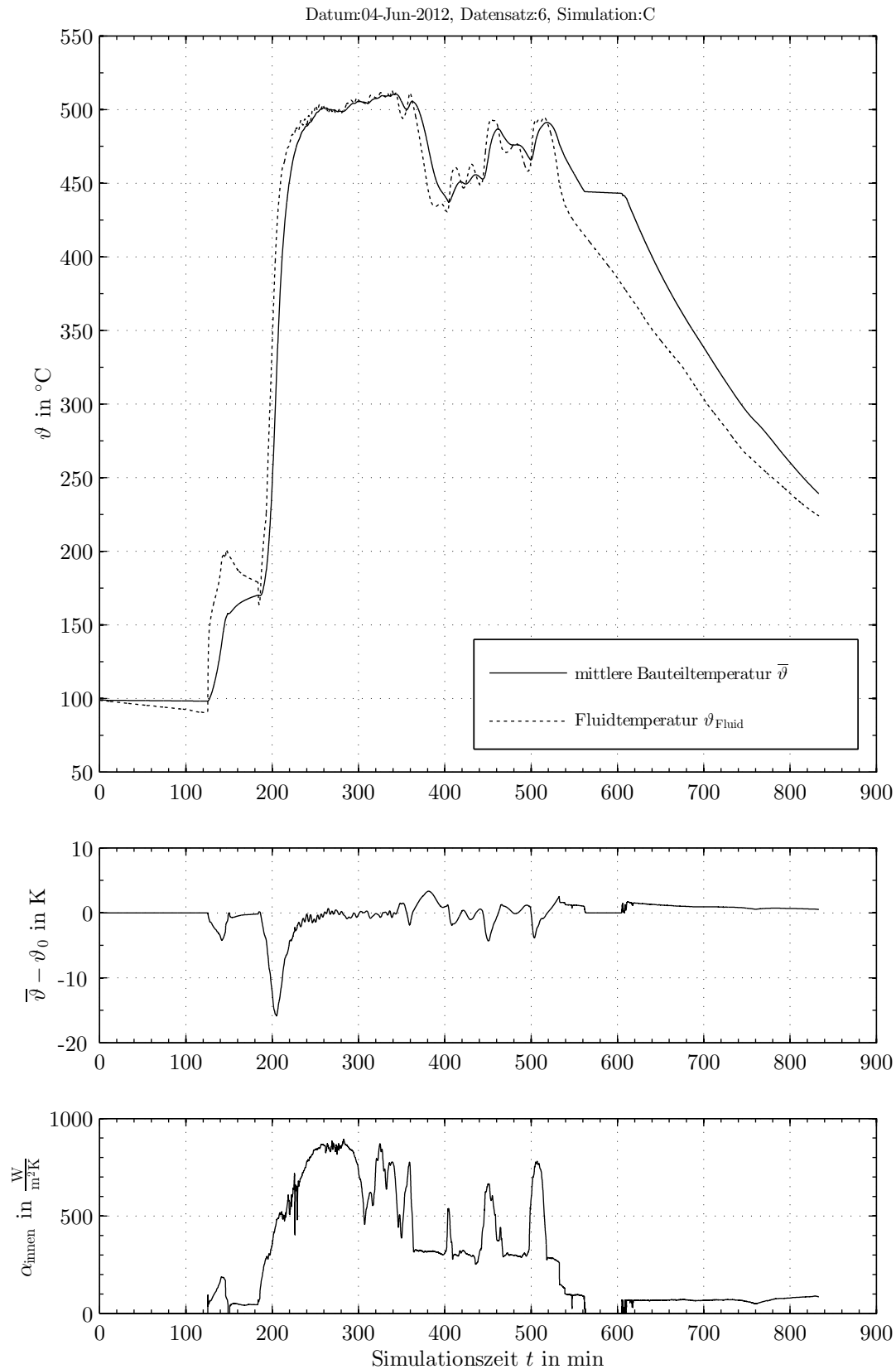


Bild E-33: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS2
(04.06.2012)

E.5 Überhitzer (Receiver)

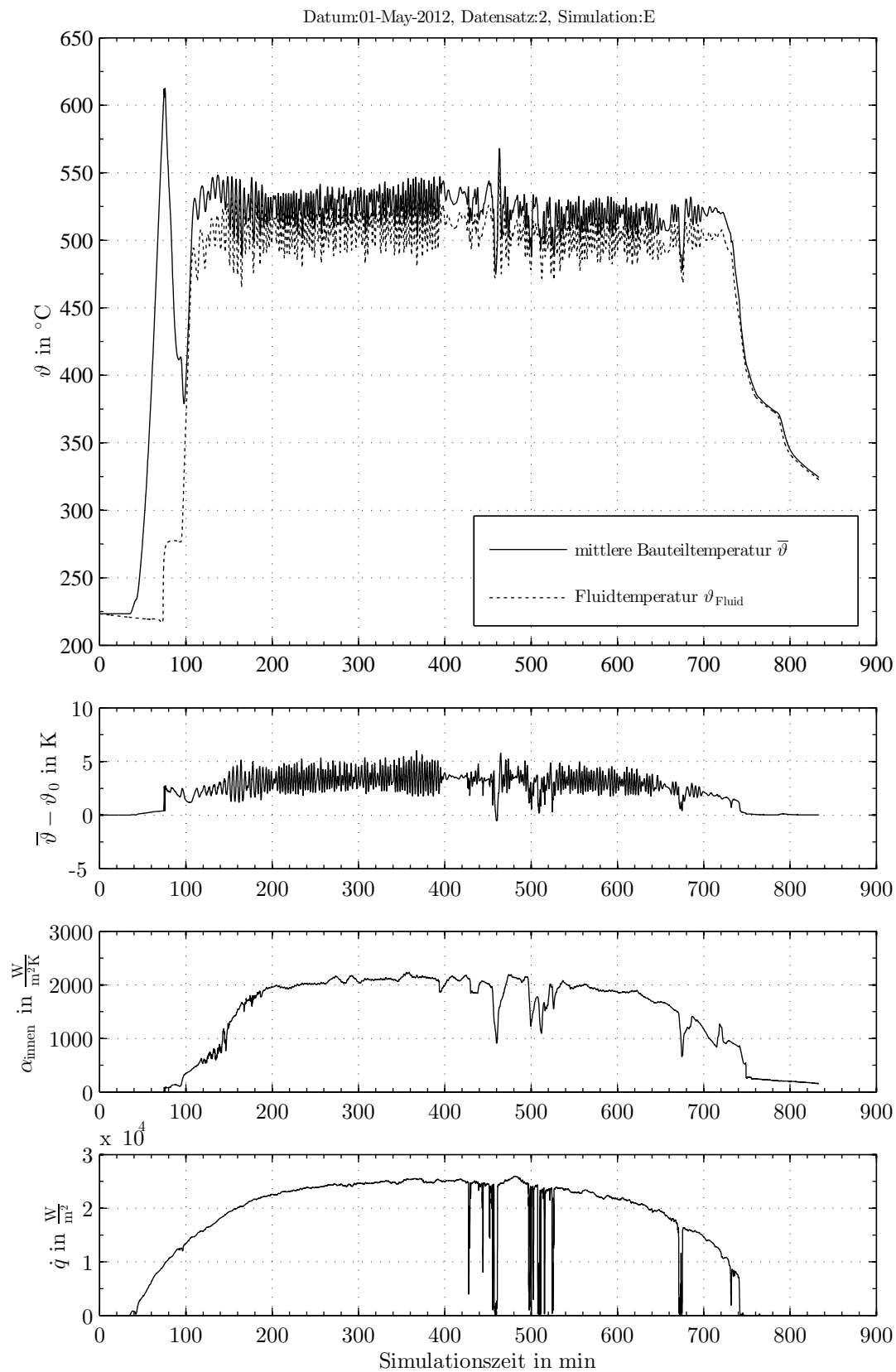


Bild E-34: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (01.05.2012)

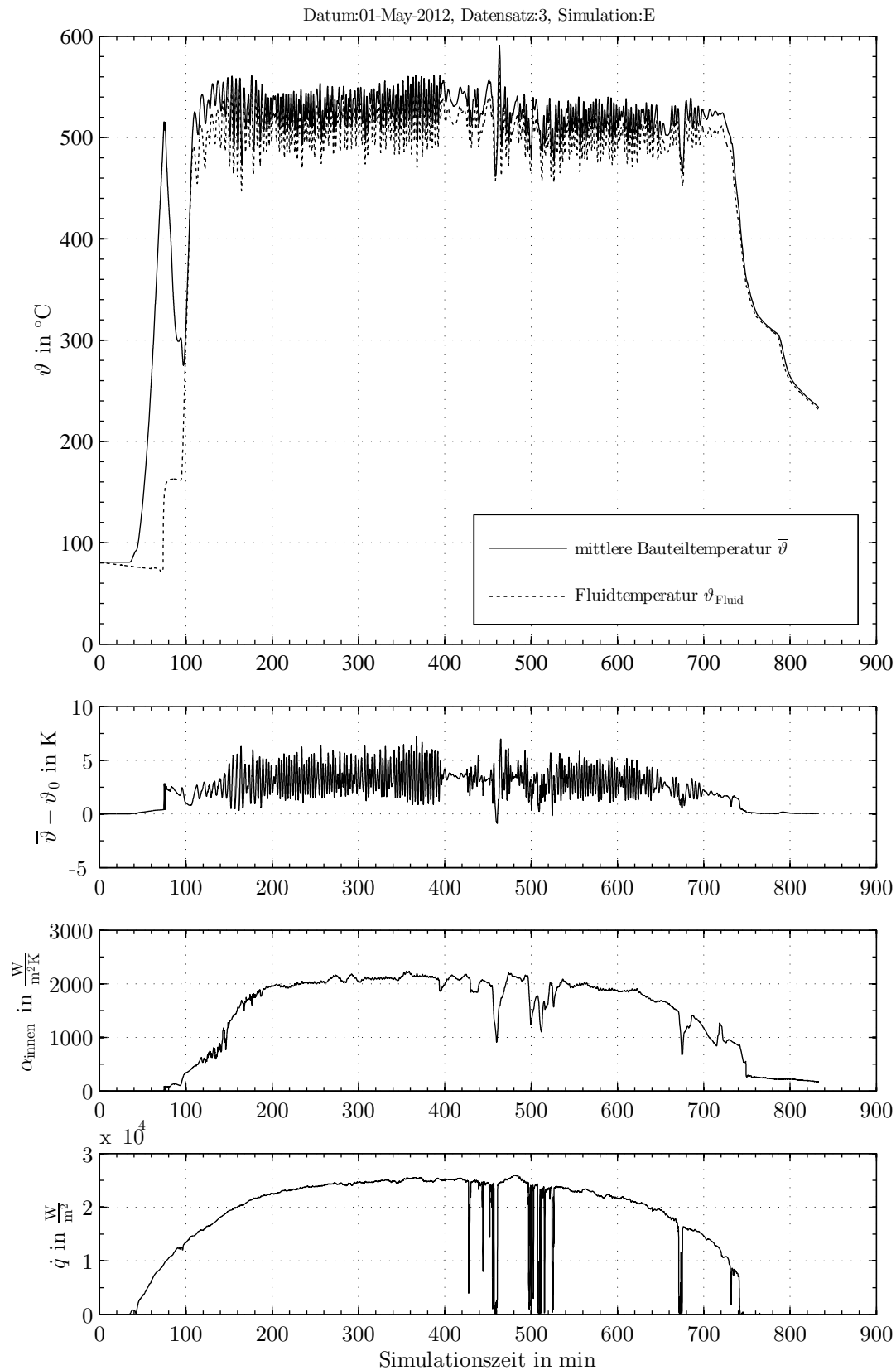


Bild E-35: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (01.05.2012)

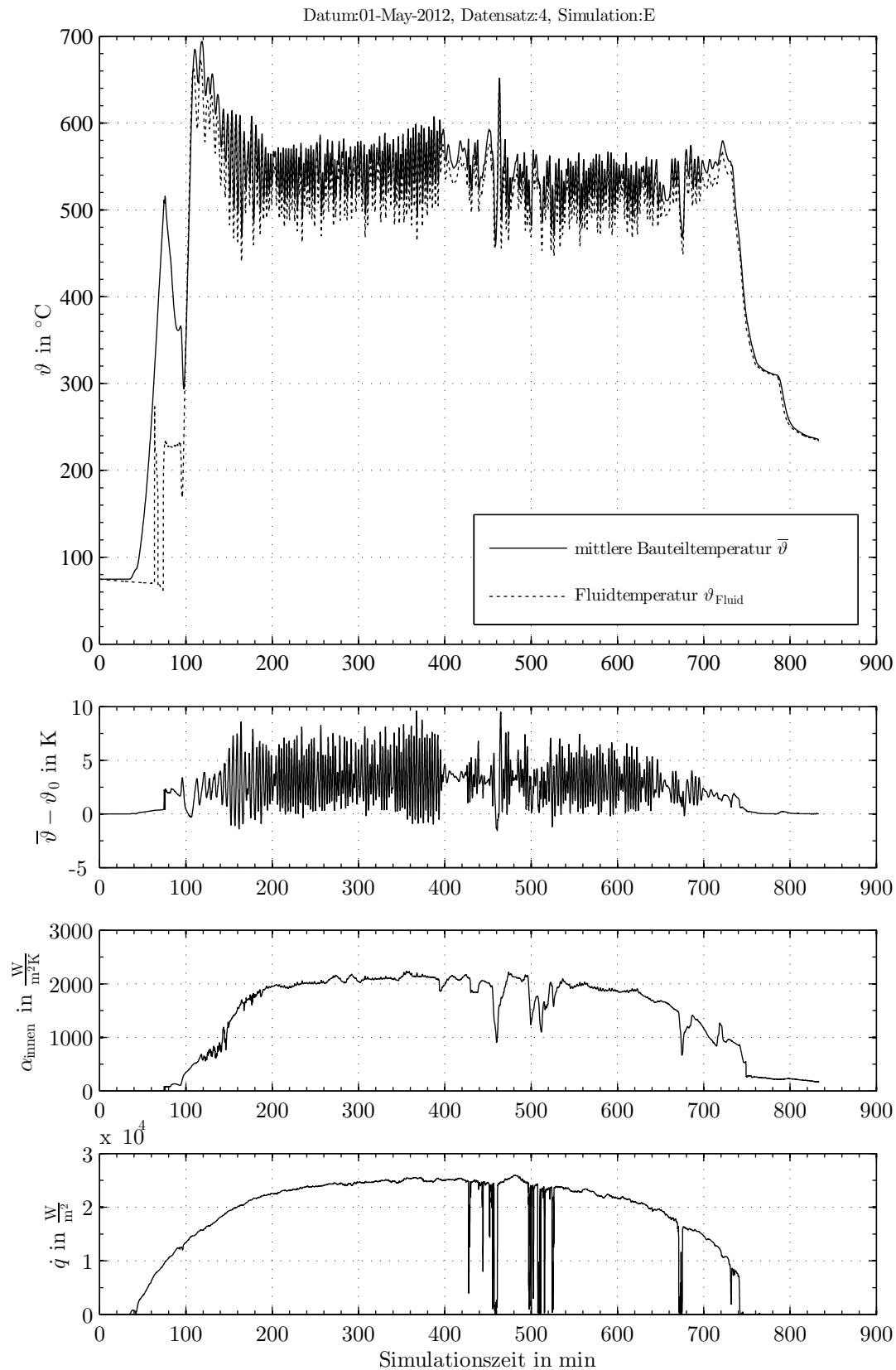


Bild E-36: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (01.05.2012)

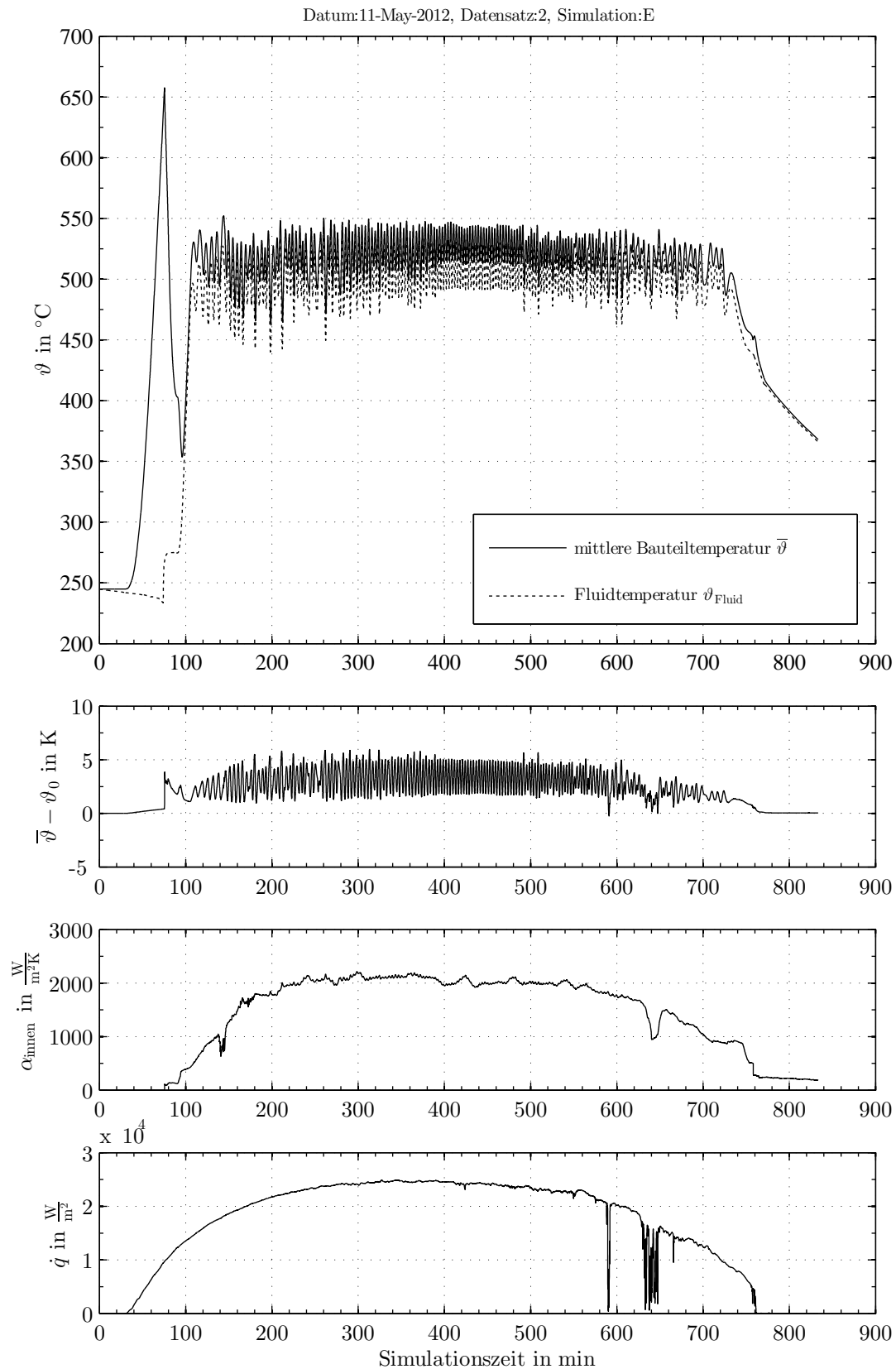


Bild E-37: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (11.05.2012)

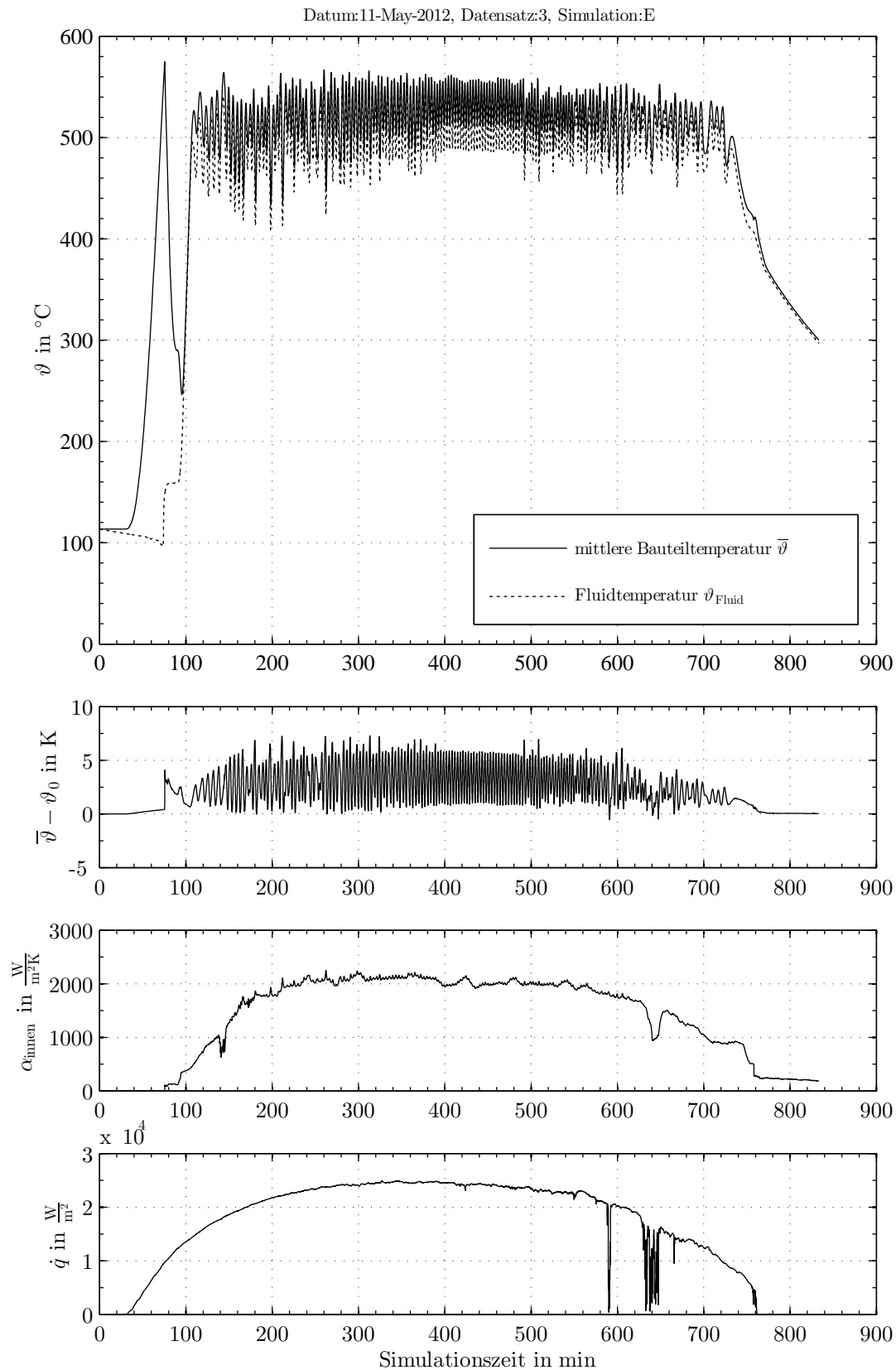


Bild E-38: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (11.05.2012)

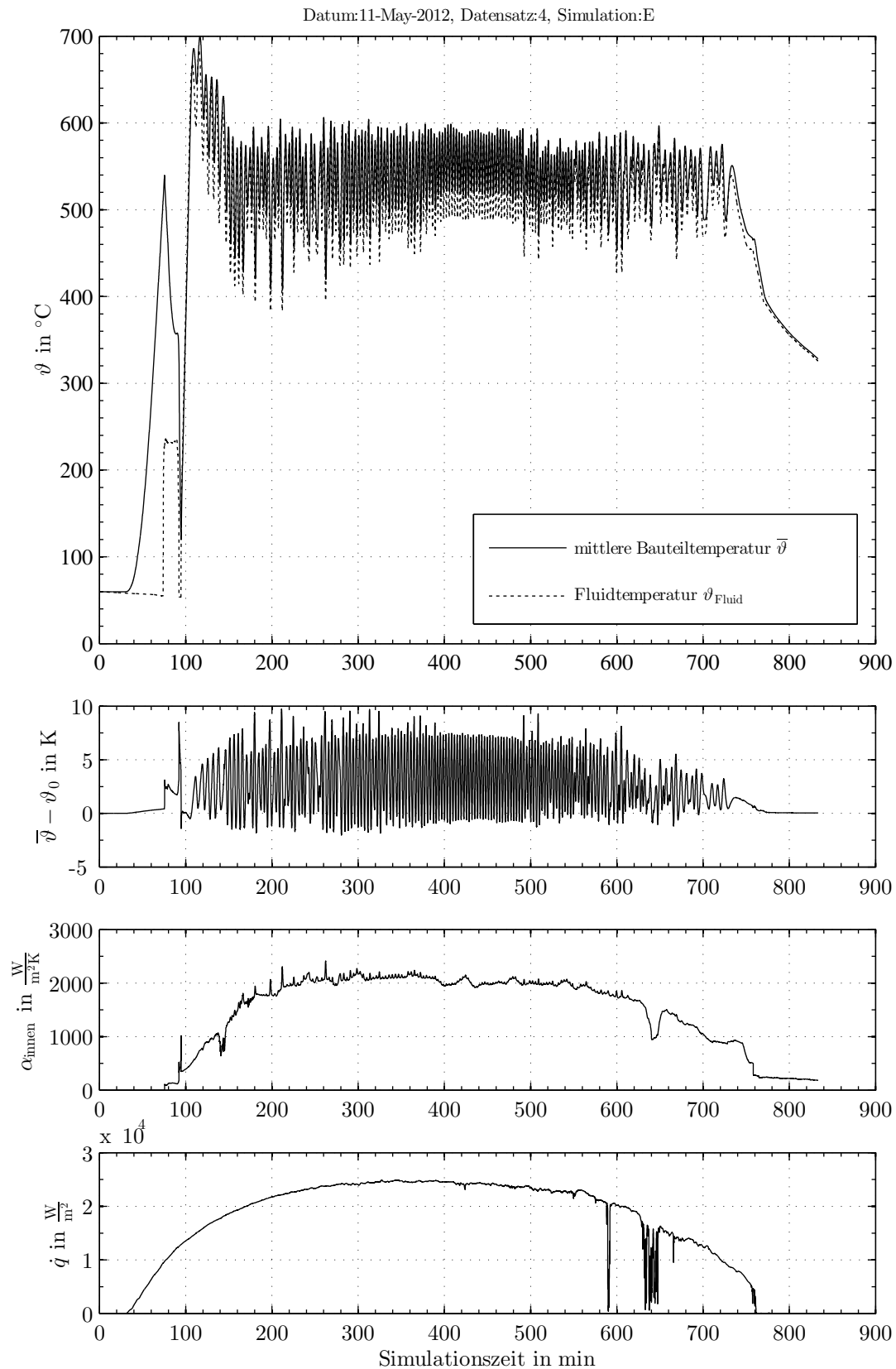


Bild E-39: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (11.05.2012)

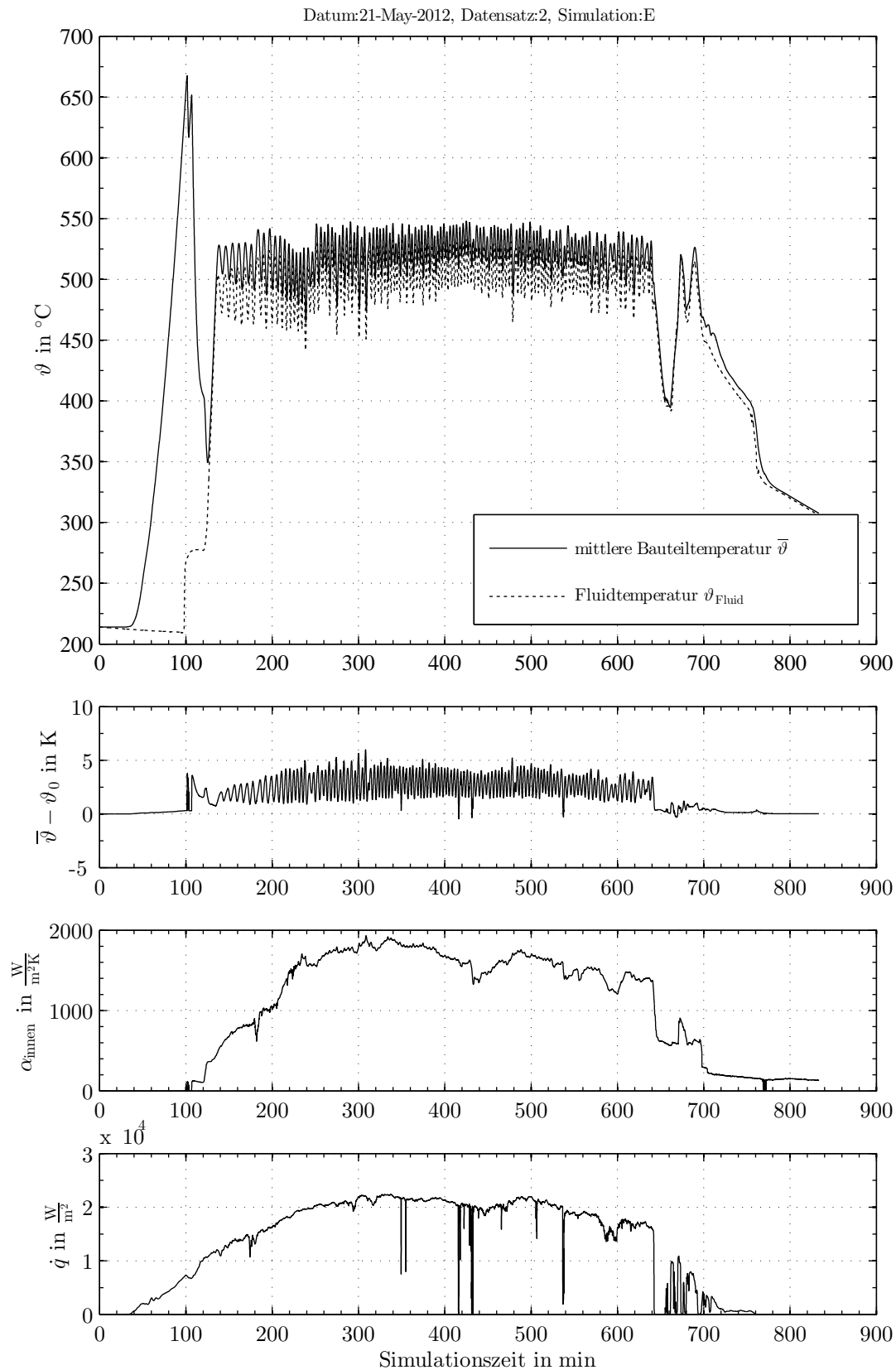


Bild E-40: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (21.05.2012)

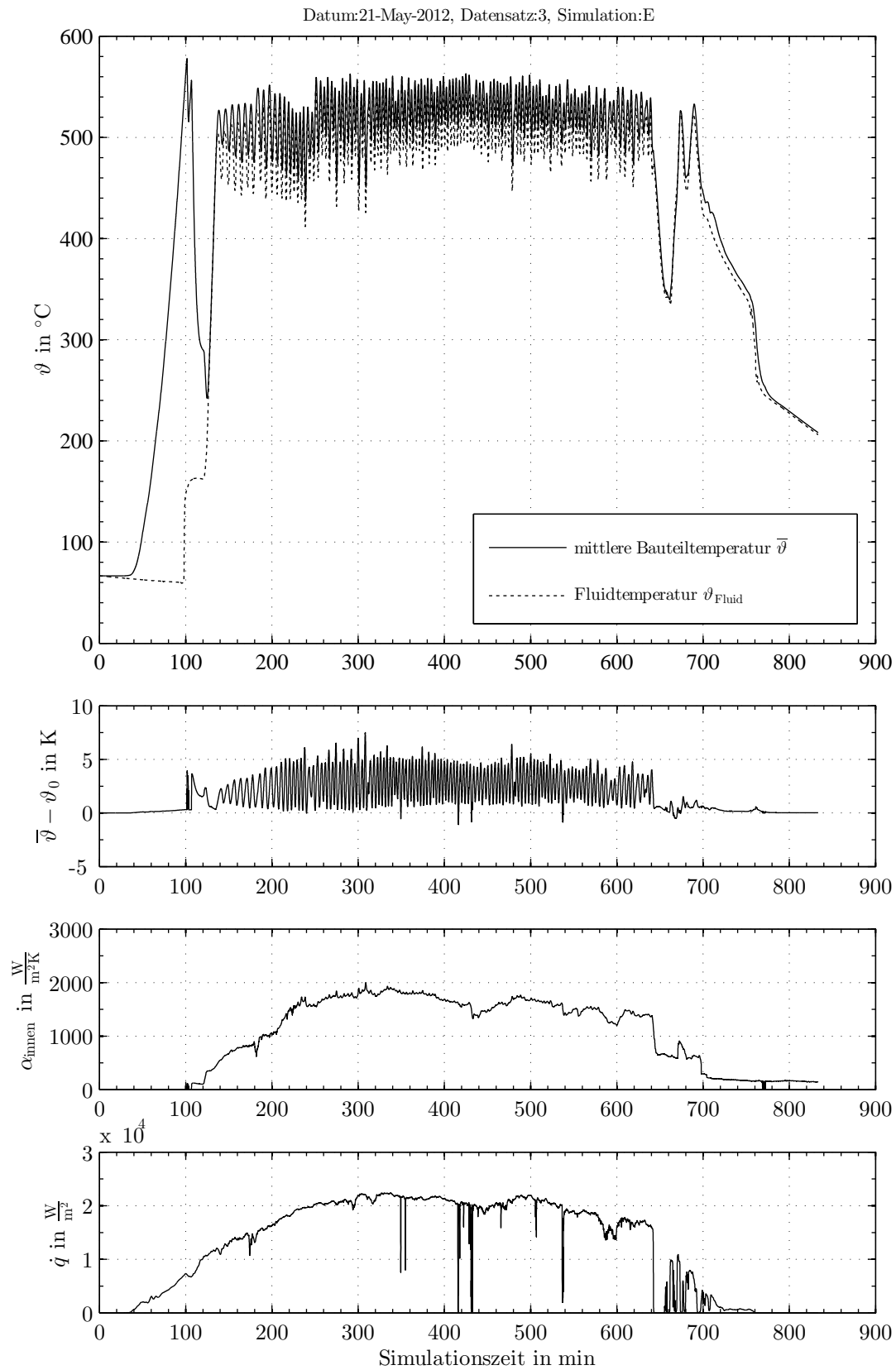


Bild E-41: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (21.05.2012)

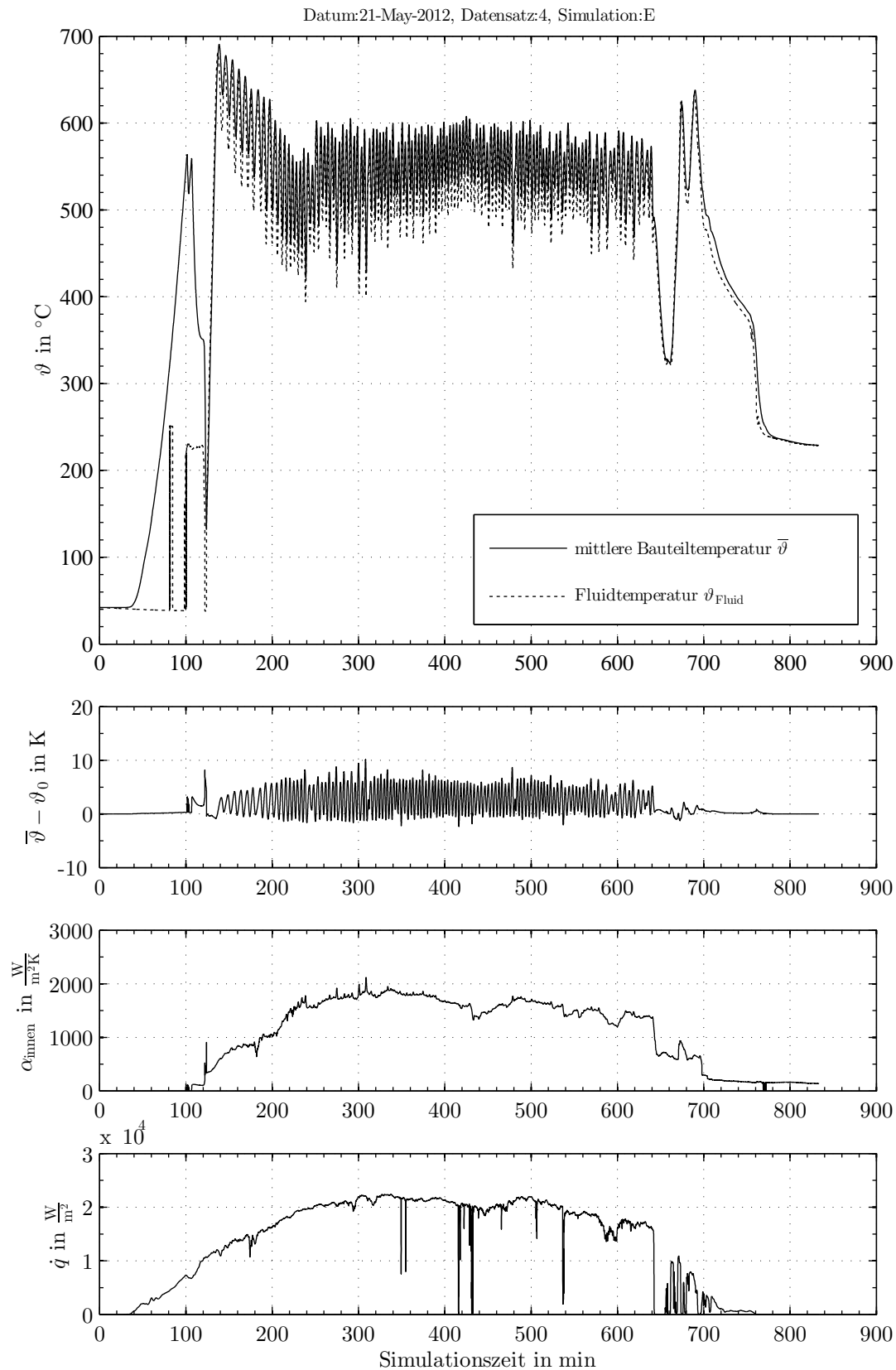
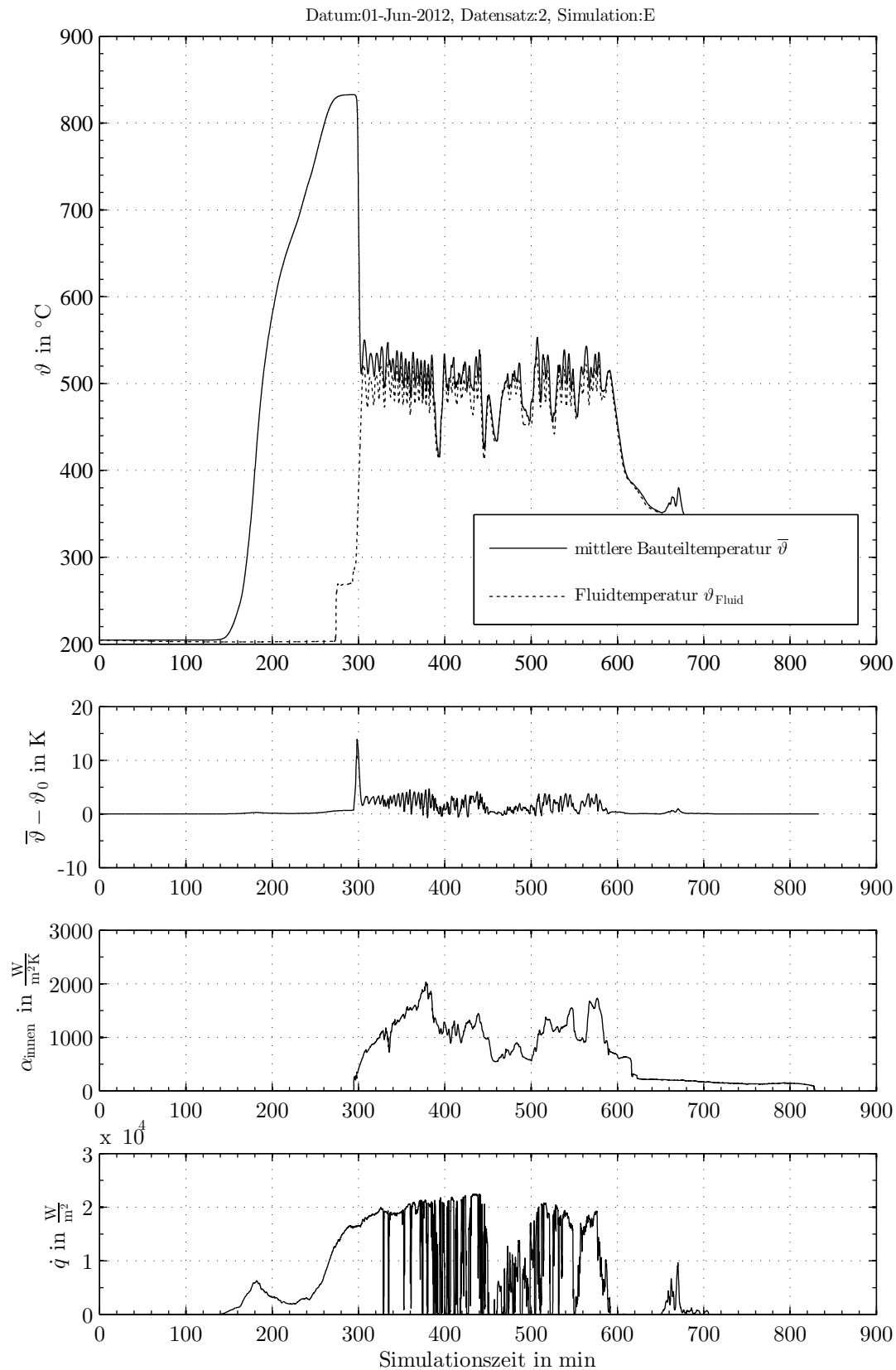


Bild E-42: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (21.05.2012)

**Bild E-43:** Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (01.06.2012)

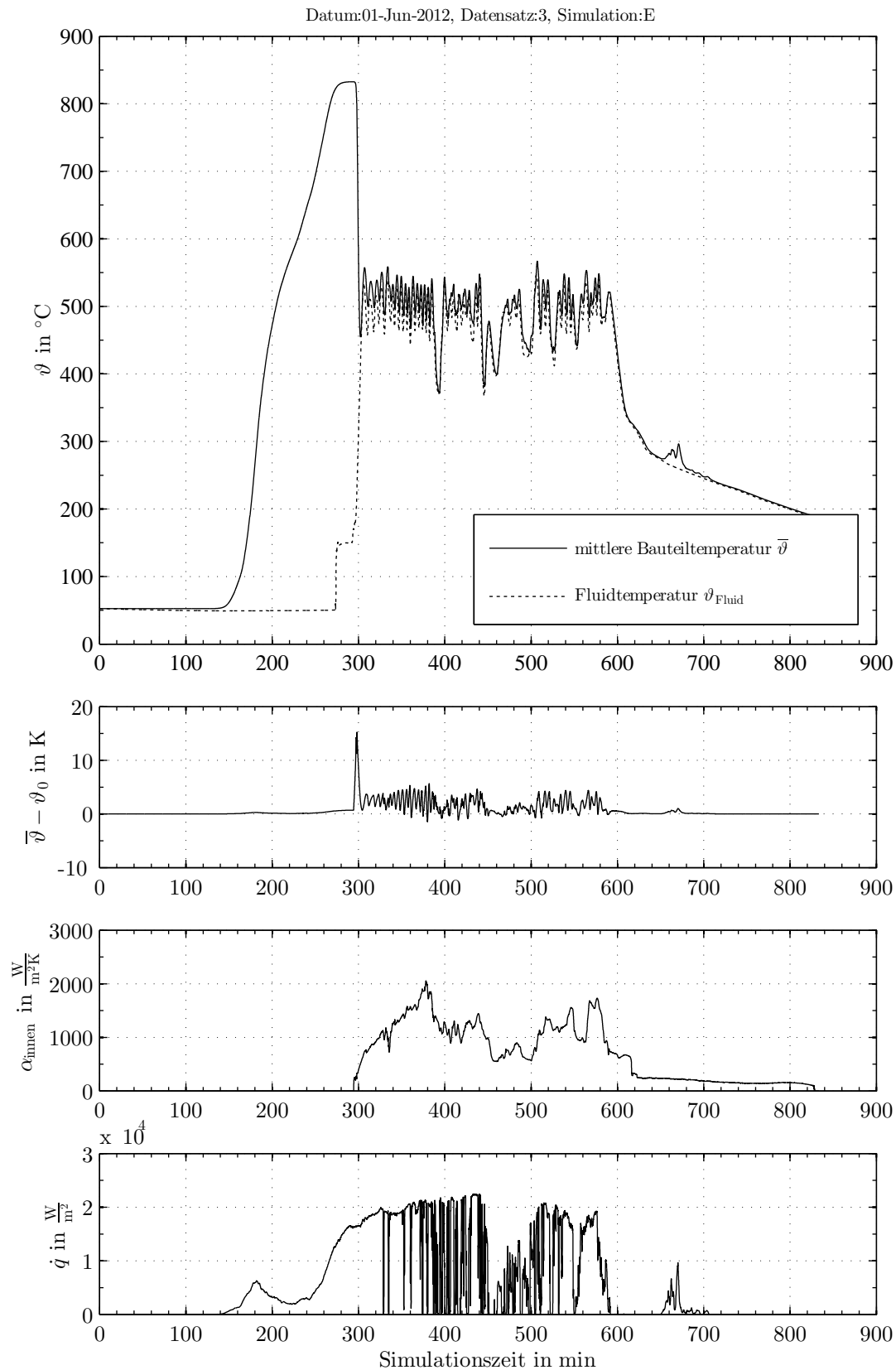
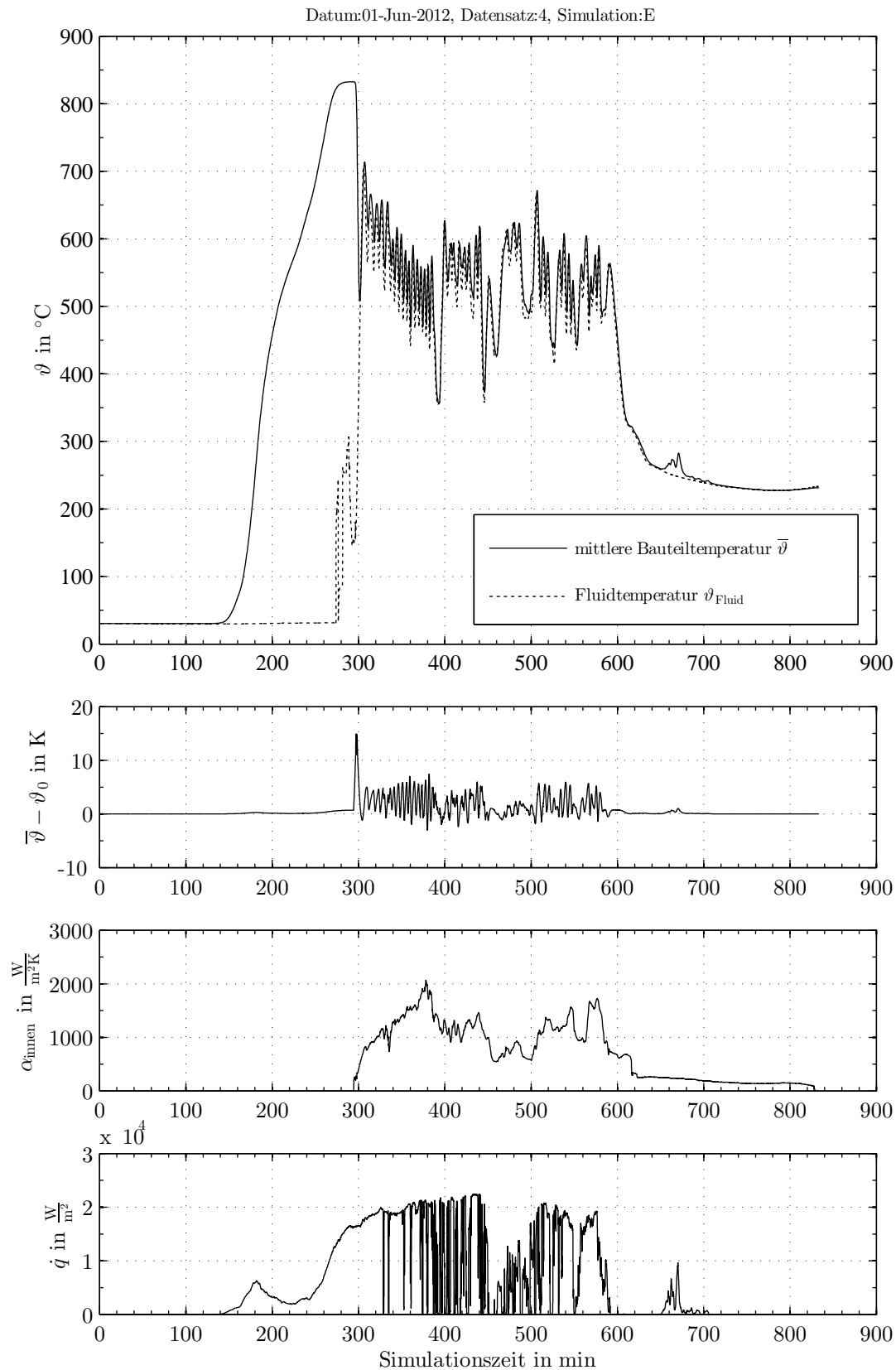


Bild E-44: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (01.06.2012)

**Bild E-45:** Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (01.06.2012)

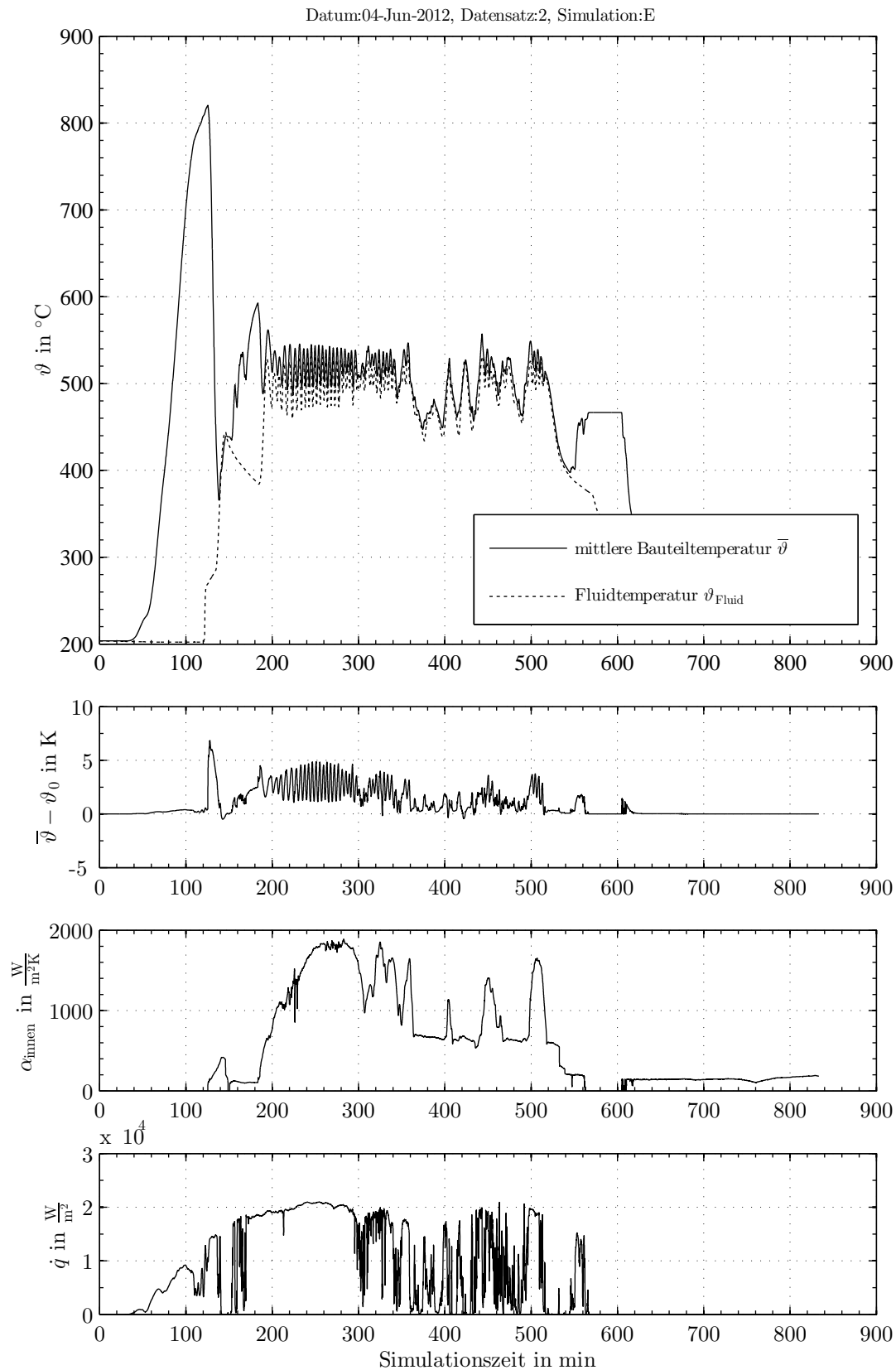


Bild E-46: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH1 (04.06.2012)

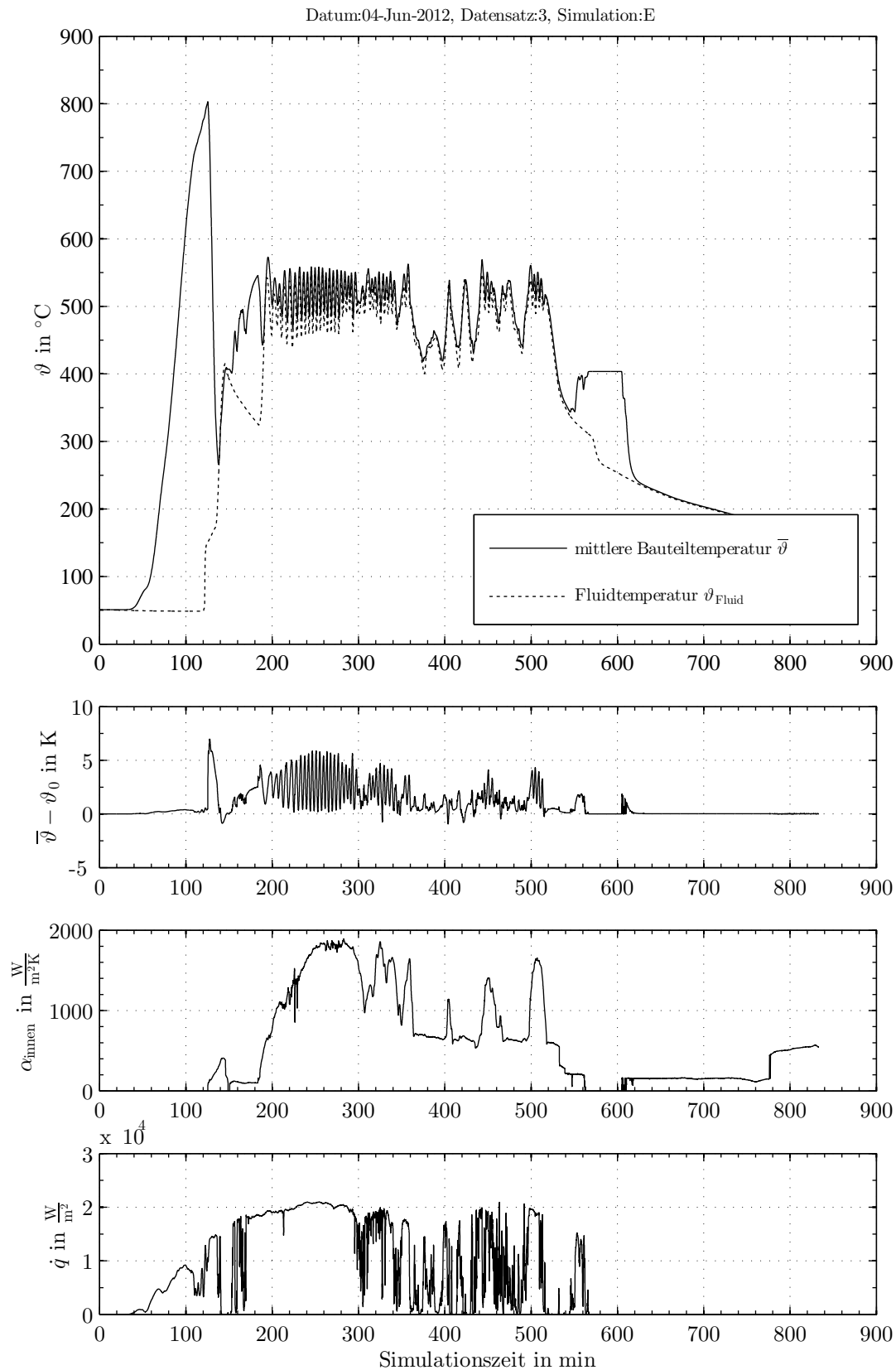


Bild E-47: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH2 (04.06.2012)

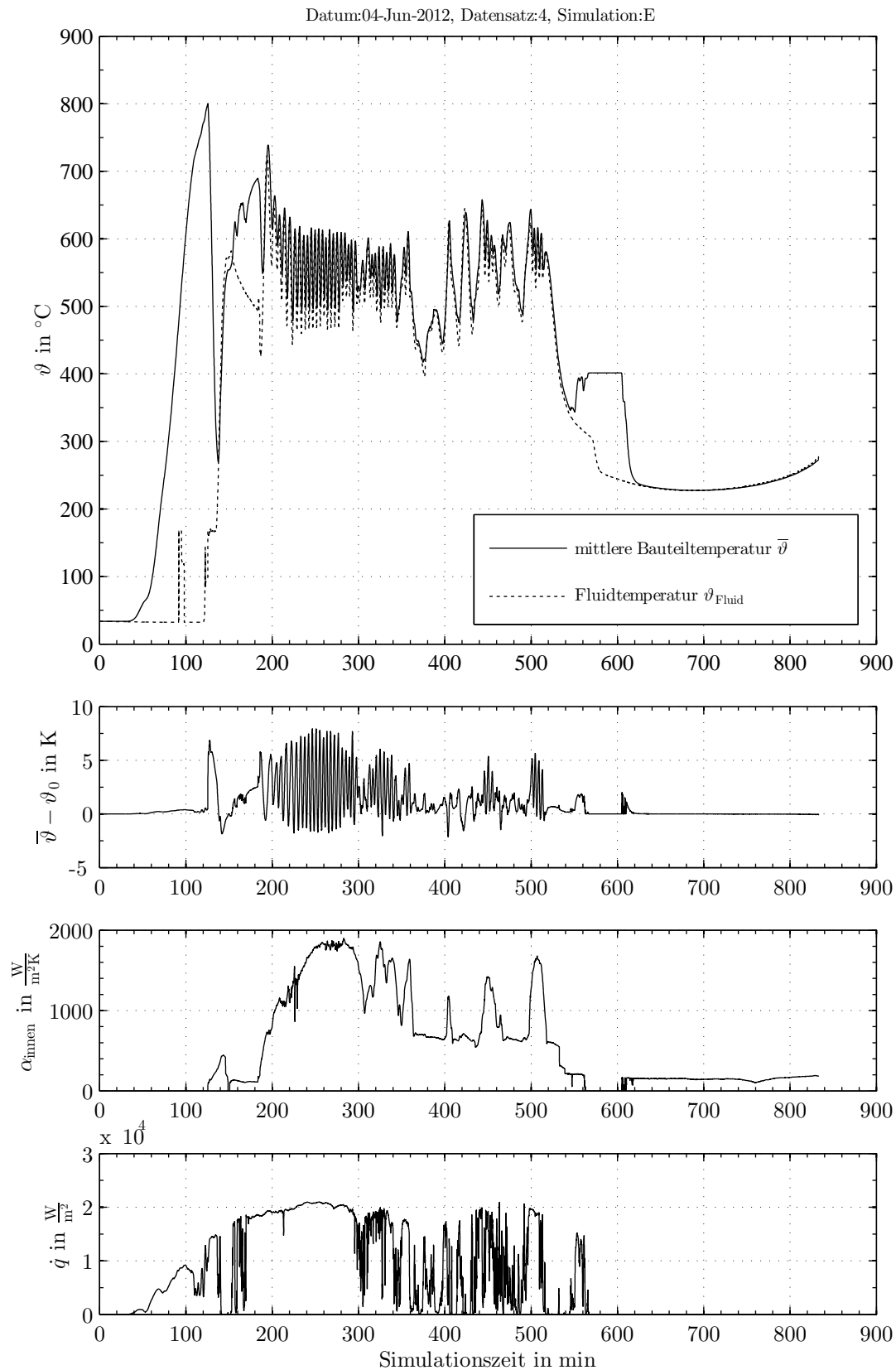


Bild E-48: Simulationsergebnis für den Überhitzer, Skalierung: ÜH3 (04.06.2012)

E.6 Frischdampfleitung

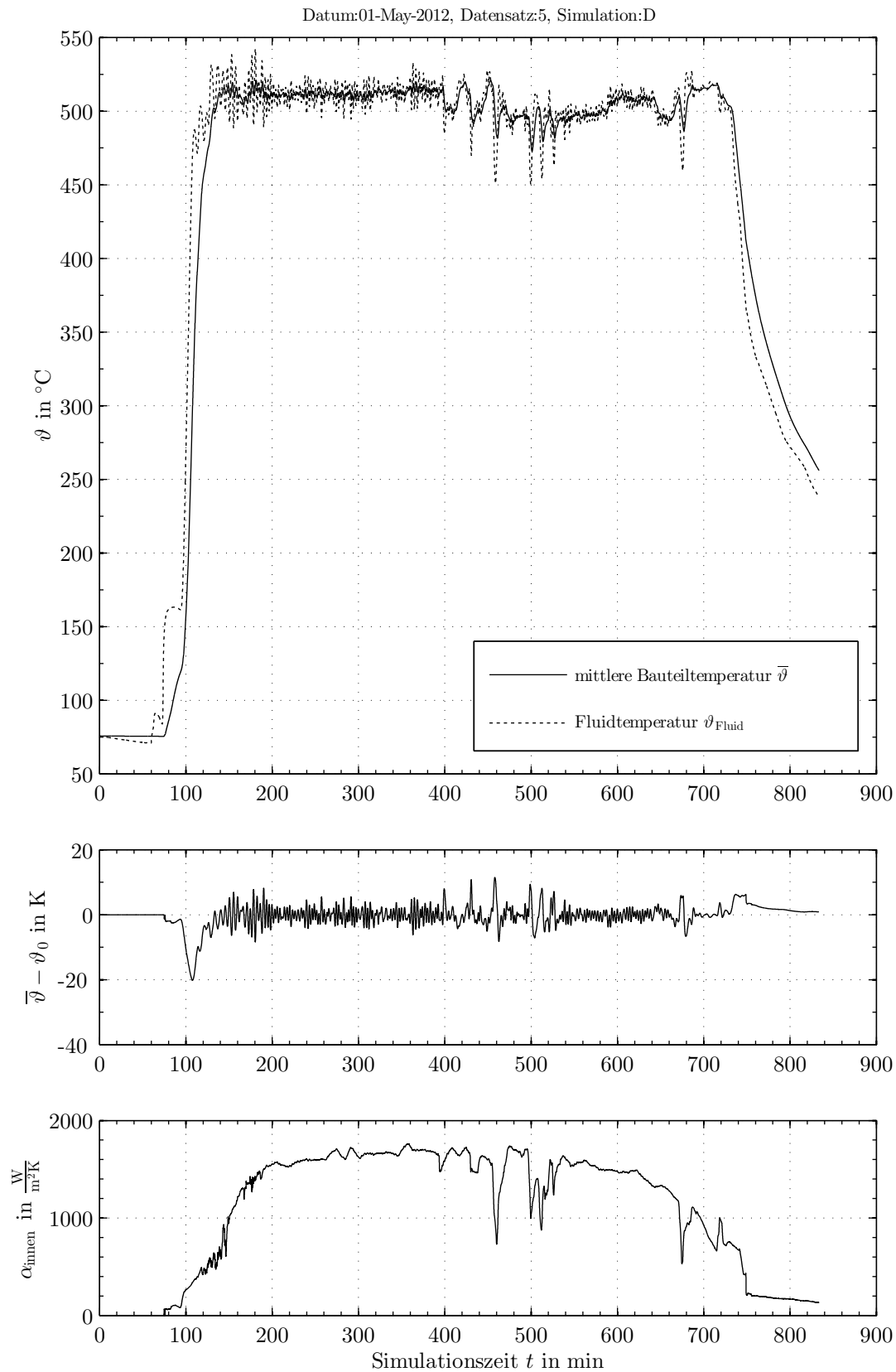


Bild E-49: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (01.05.2012)

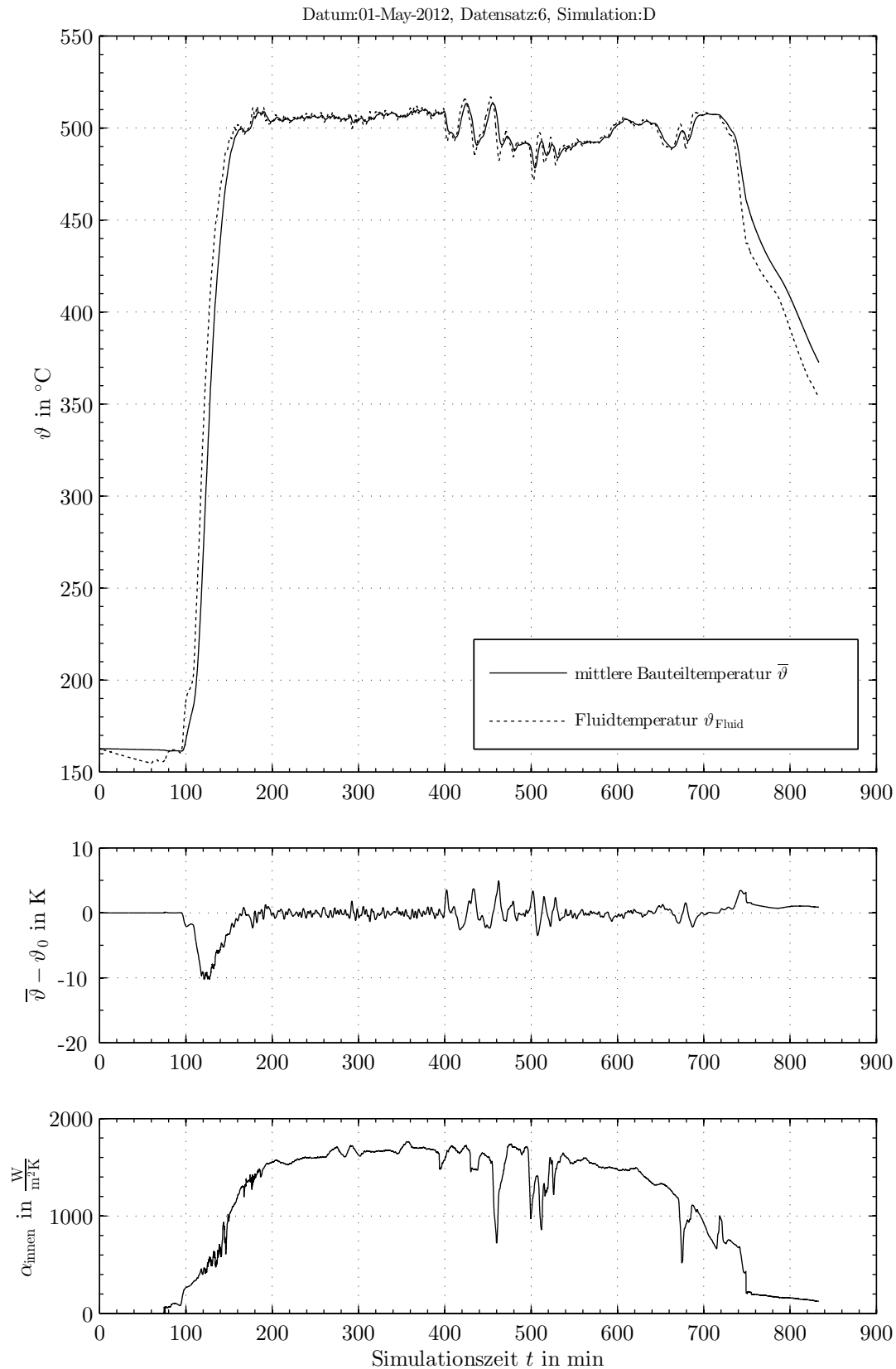


Bild E-50: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (01.05.2012)

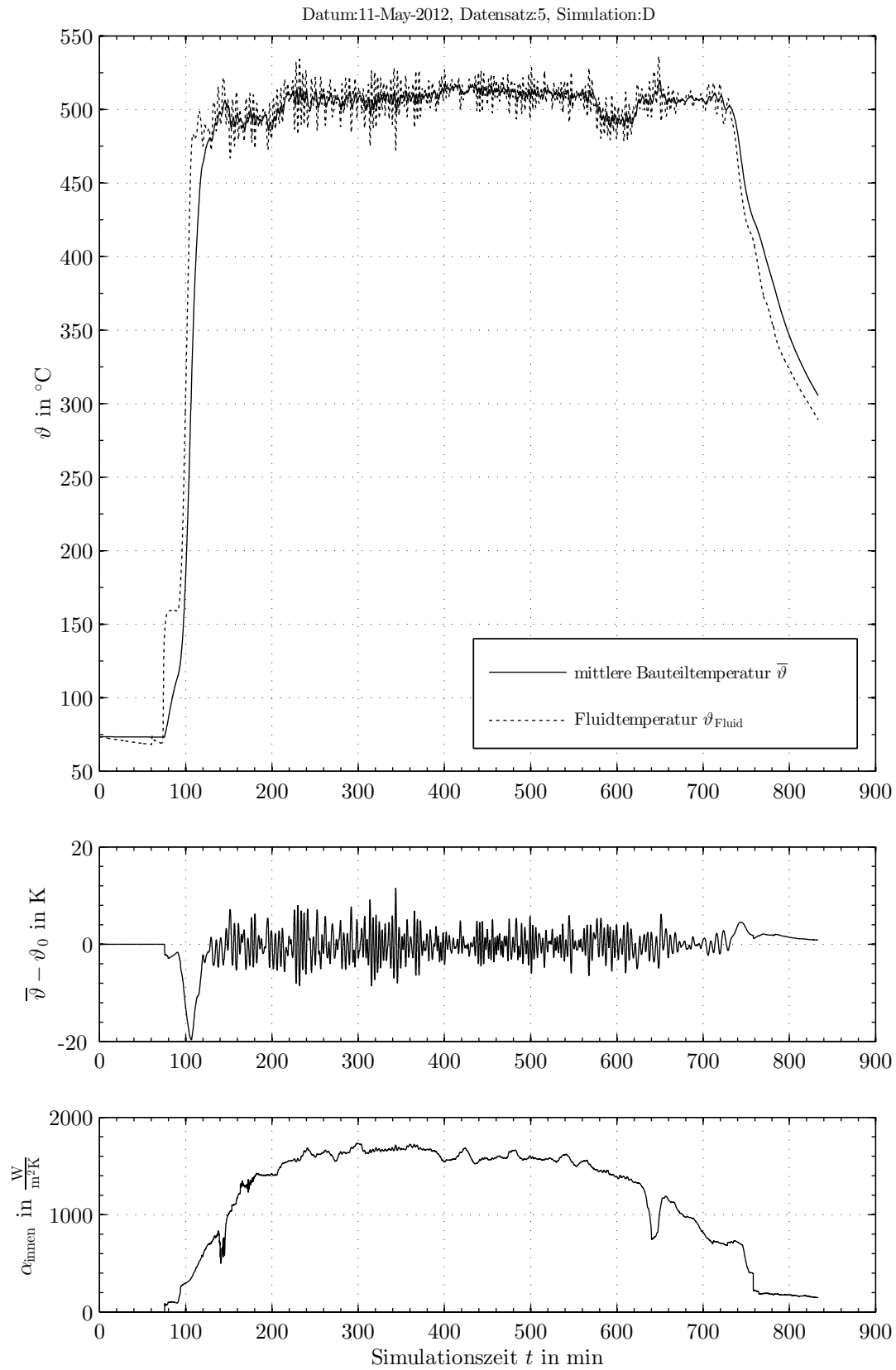


Bild E-51: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (11.05.2012)

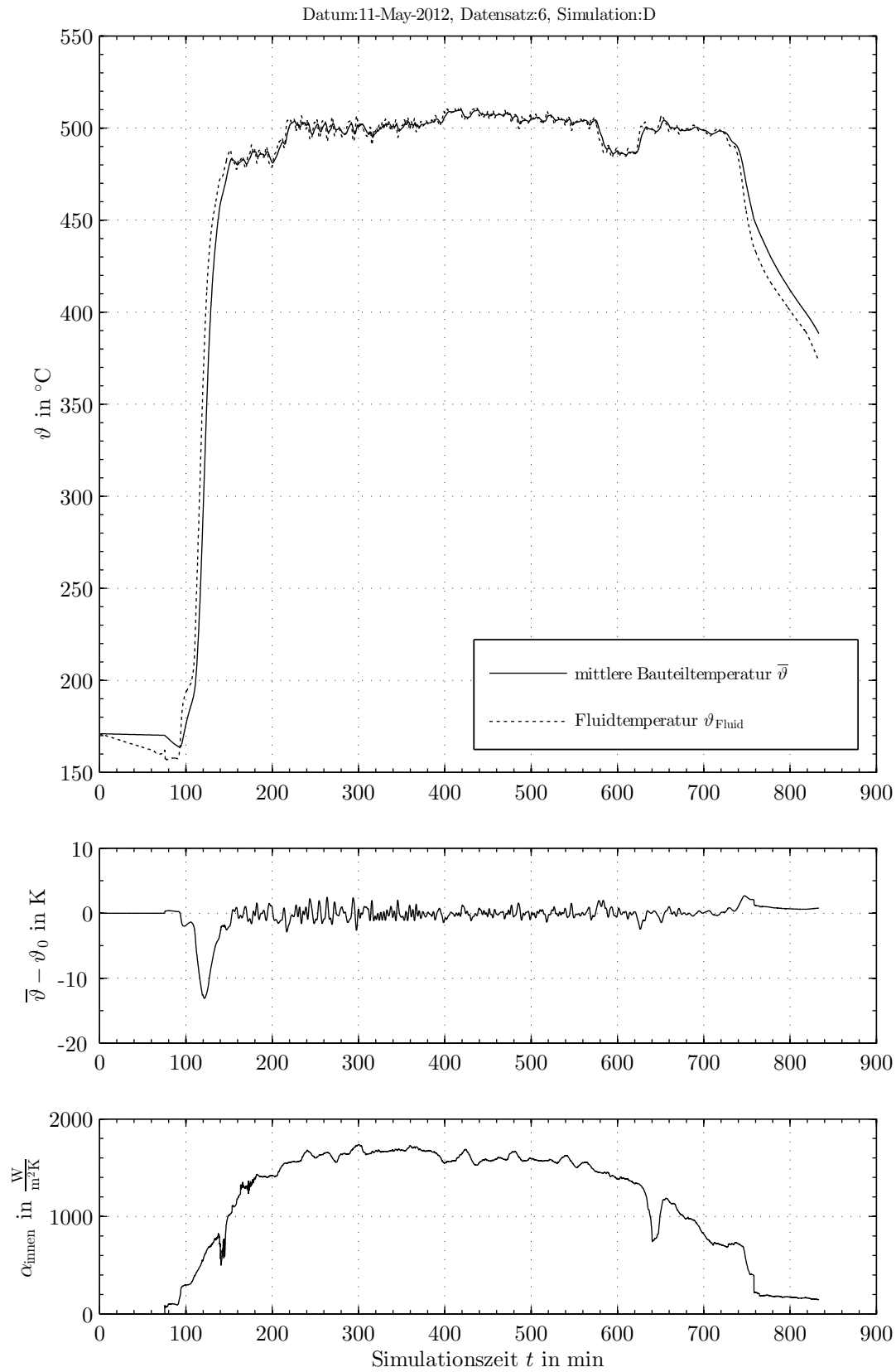


Bild E-52: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (11.05.2012)

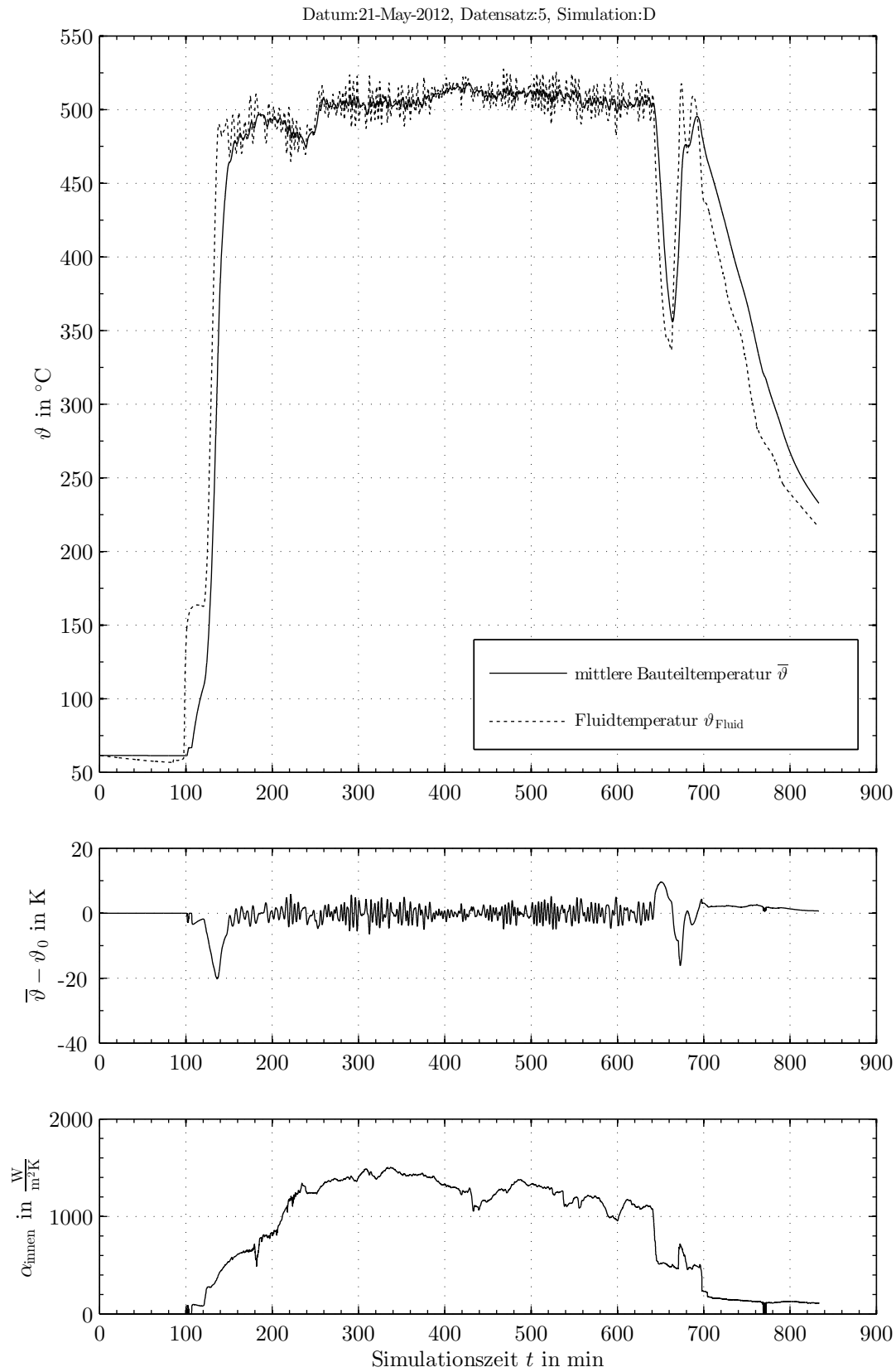
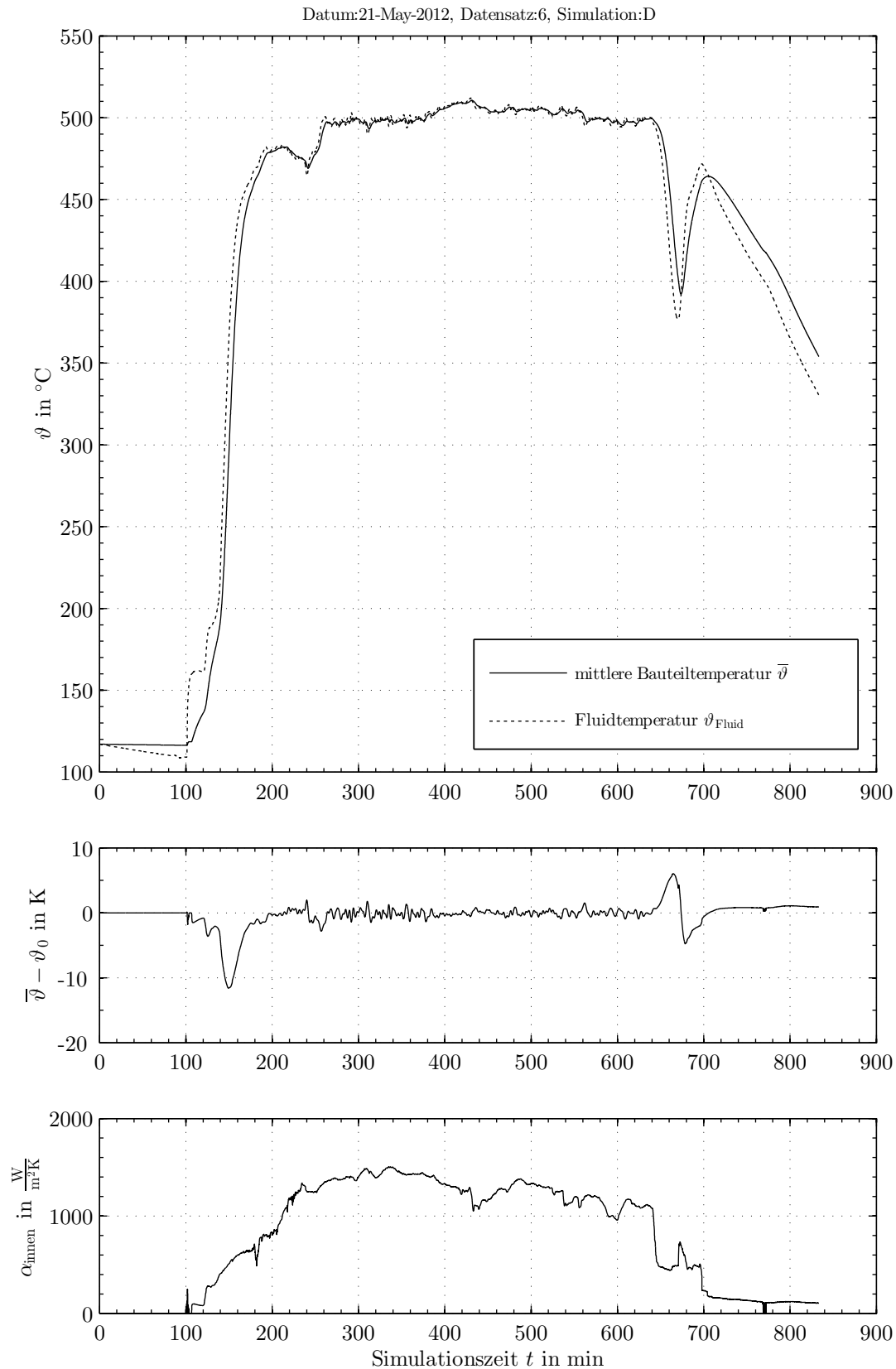
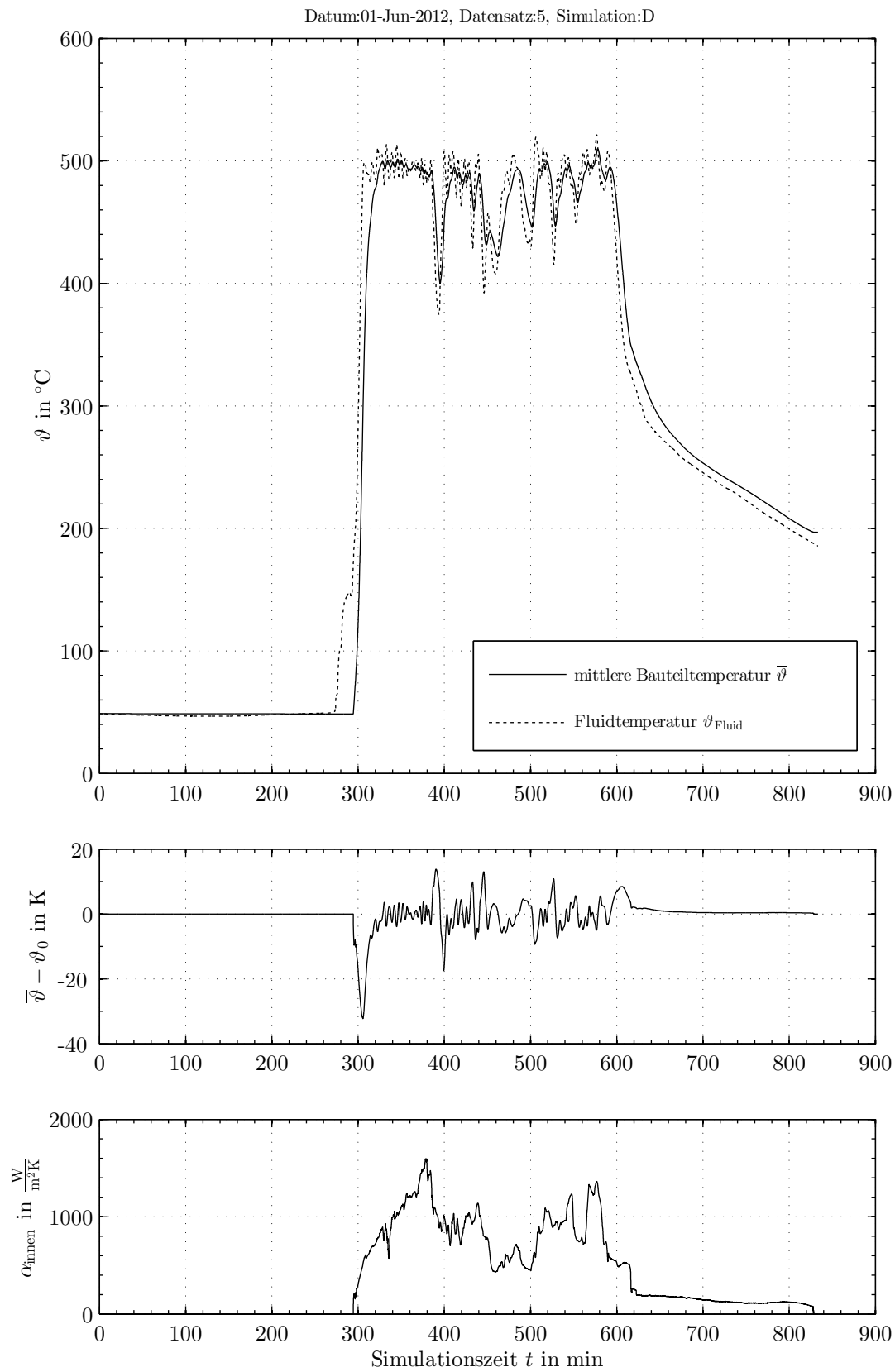
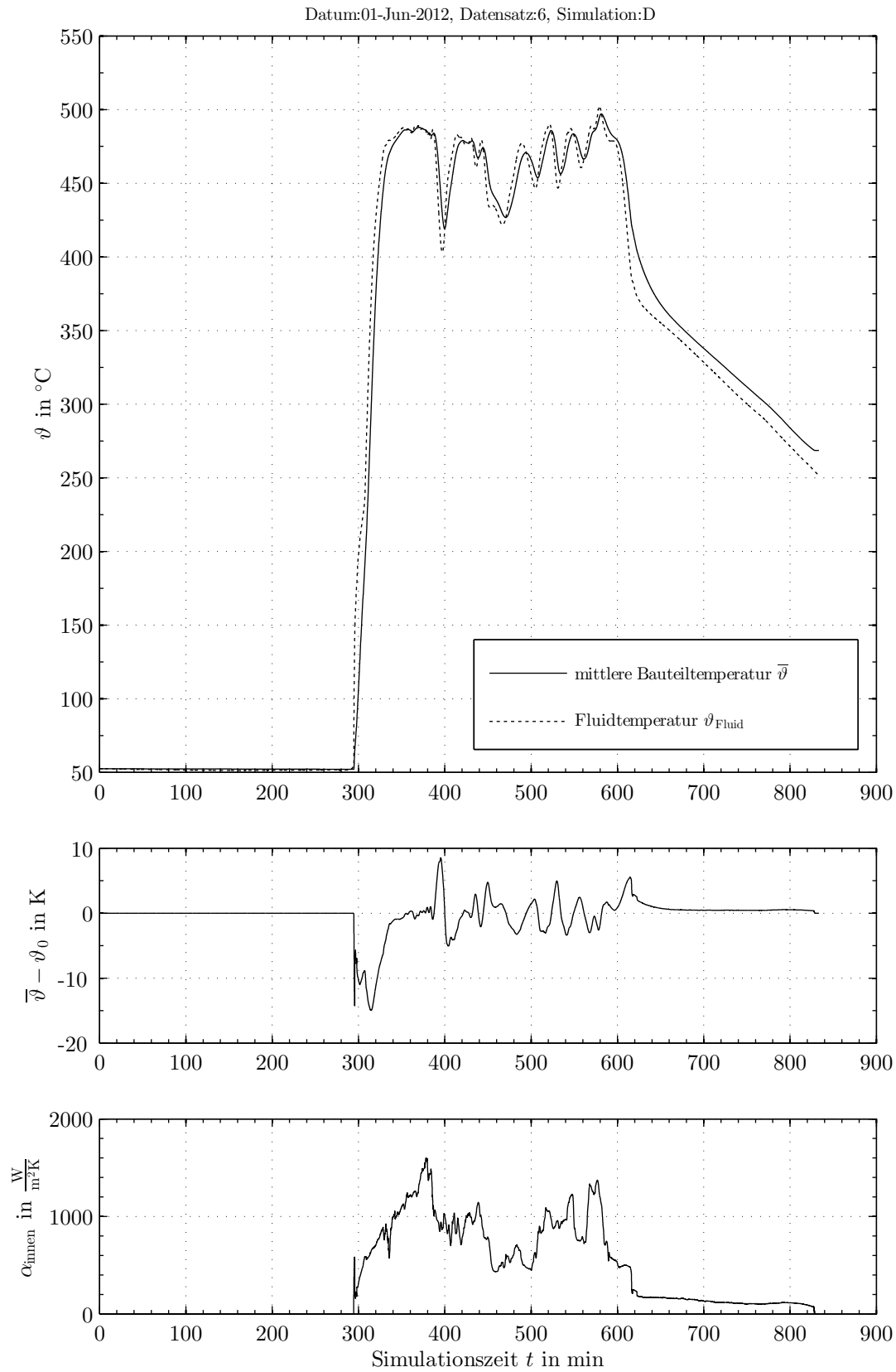
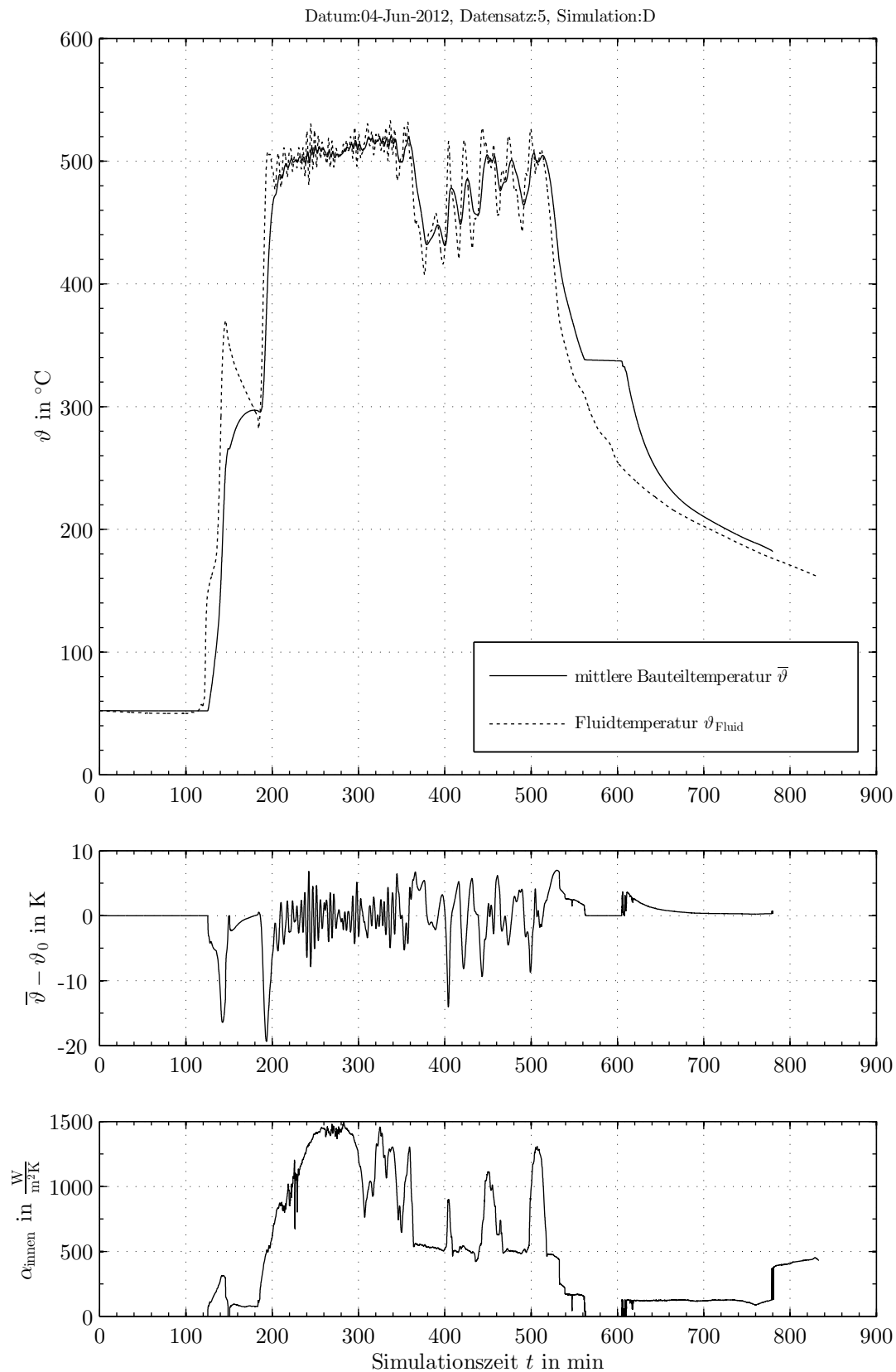


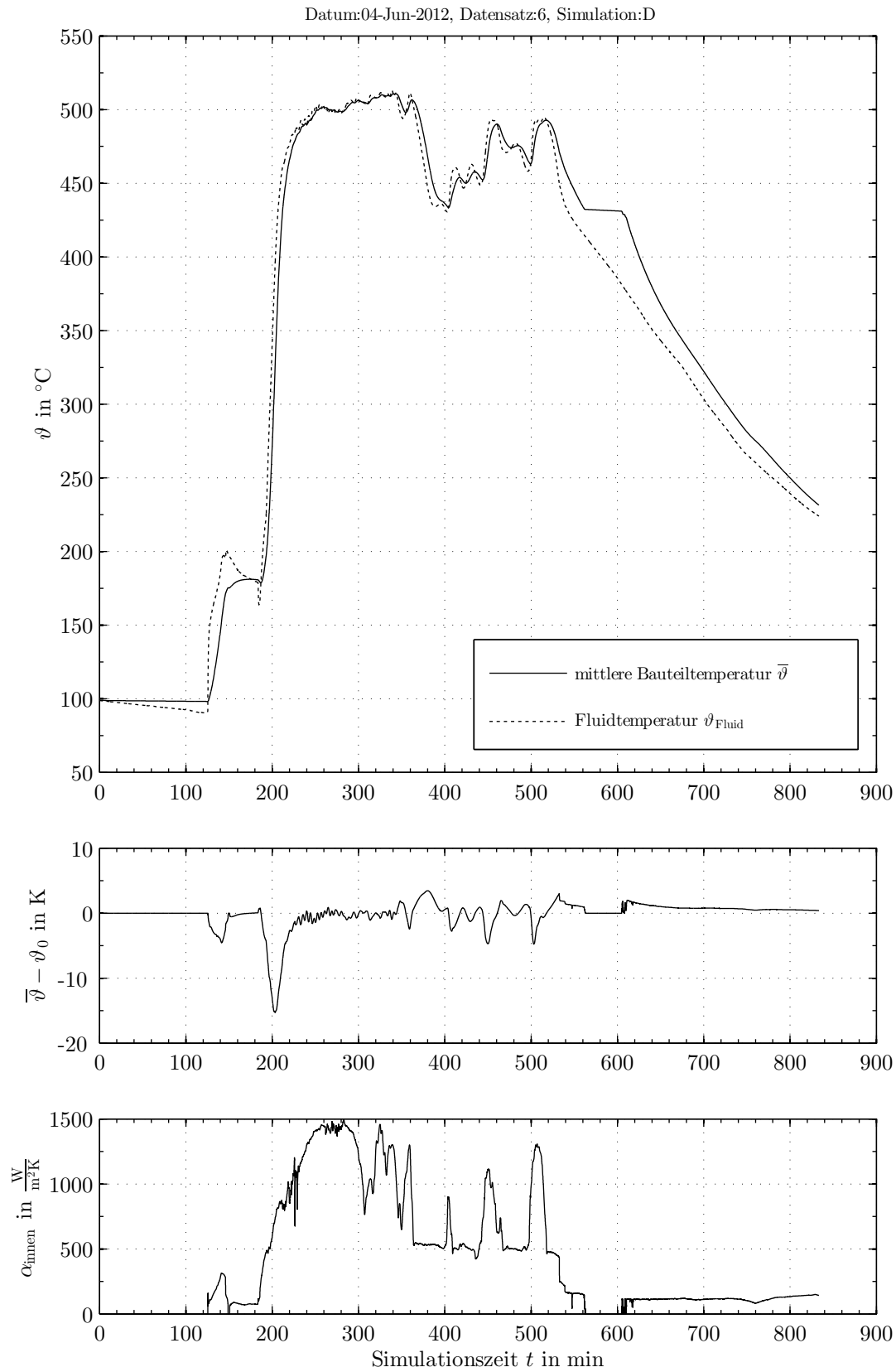
Bild E-53: Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (21.05.2012)

**Bild E-54:** Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (21.05.2012)

**Bild E-55:** Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (01.06.2012)

**Bild E-56:** Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (01.06.2012)

**Bild E-57:** Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS1 (04.06.2012)

**Bild E-58:** Simulationsergebnis für die Frischdampfleitung, Skalierung: ÜHS2 (04.06.2012)

E.7 Ausgesuchte Simulationsergebnisse der Variationsrechnungen

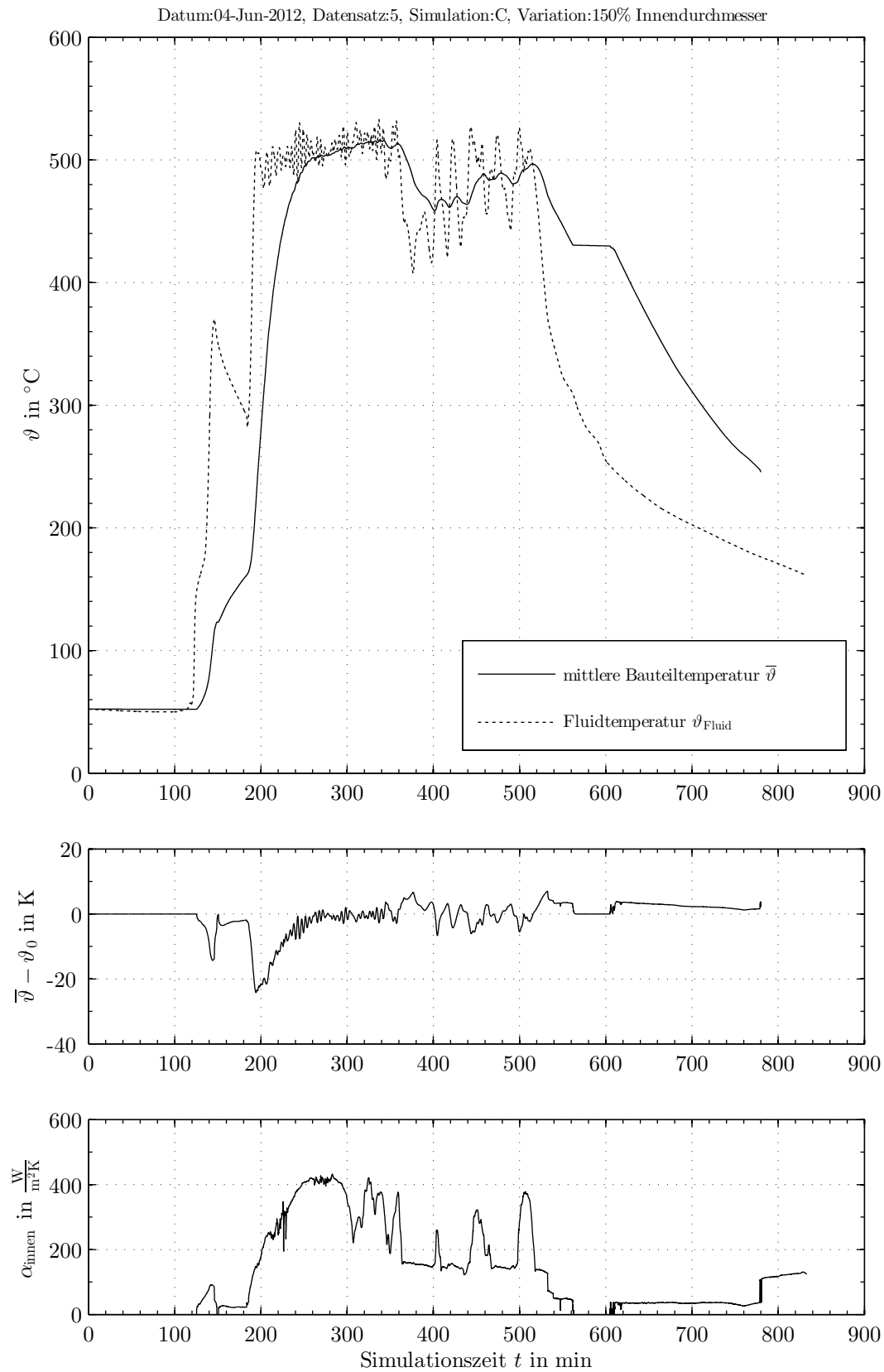


Bild E-59: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1, mit 150 % Innendurchmesser (04.06.2012)

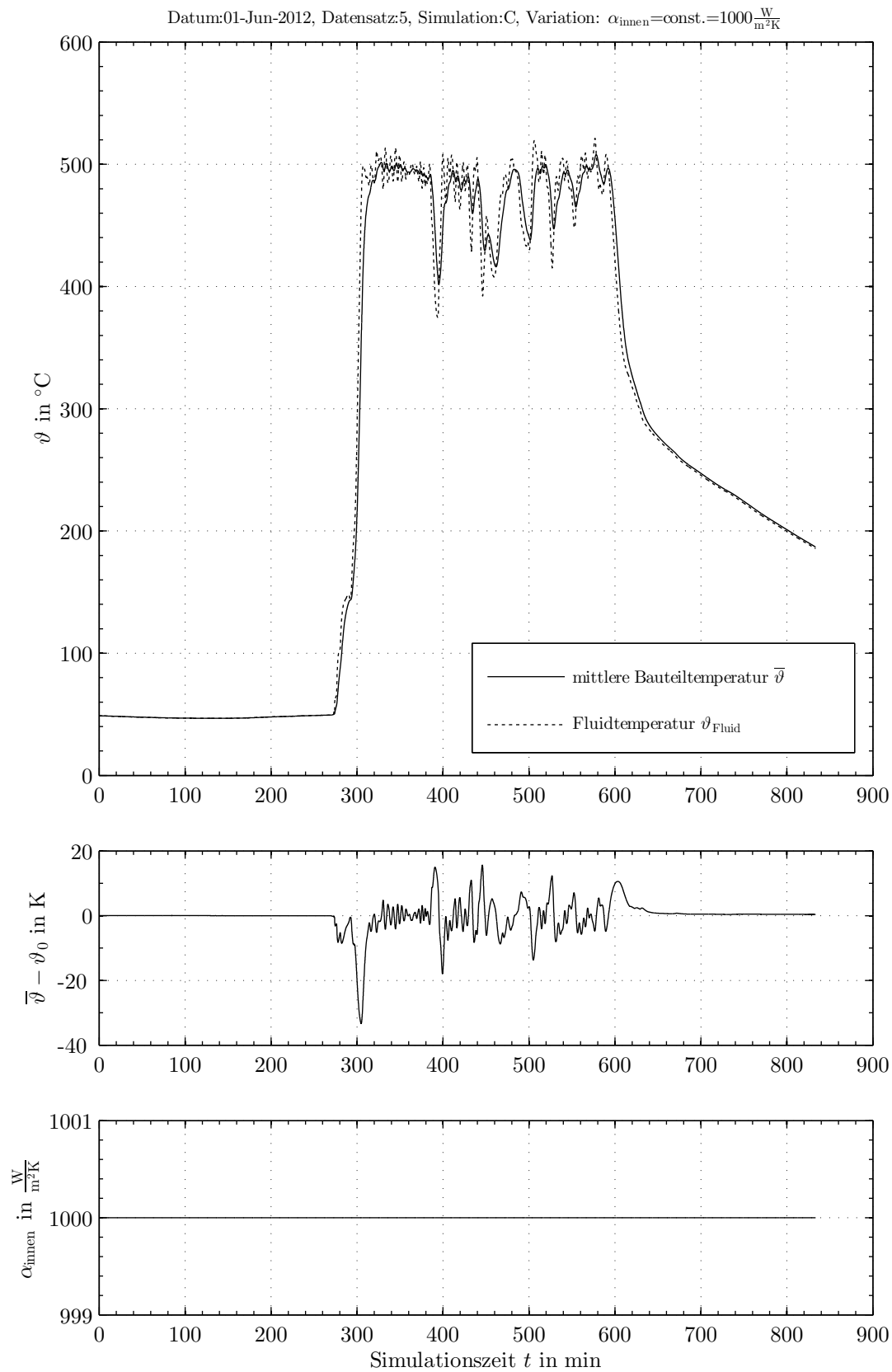


Bild E-60: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1, mit konstantem $\alpha_i = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ (01.06.2012)

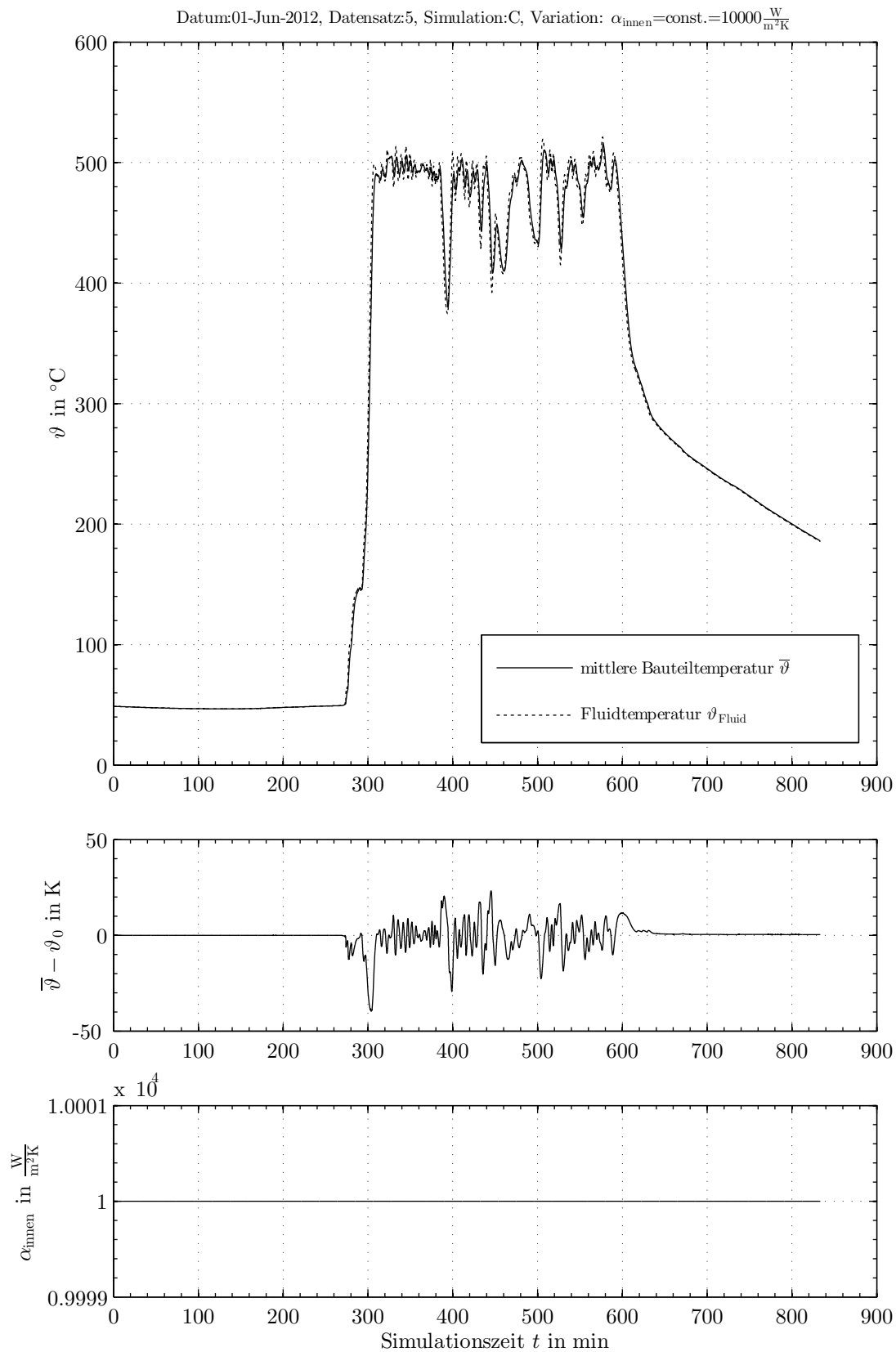


Bild E-61: Simulationsergebnis für den Überhitzersammler, letzter Strang, Skalierung: ÜHS1, mit konstantem $\alpha_i = 10000 \text{ W/m}^2\text{K}$ (01.06.2012)

Anhang F Ausgesuchte Ergebnisse der Ermüdungsberechnung

F.1 Ohne Variation

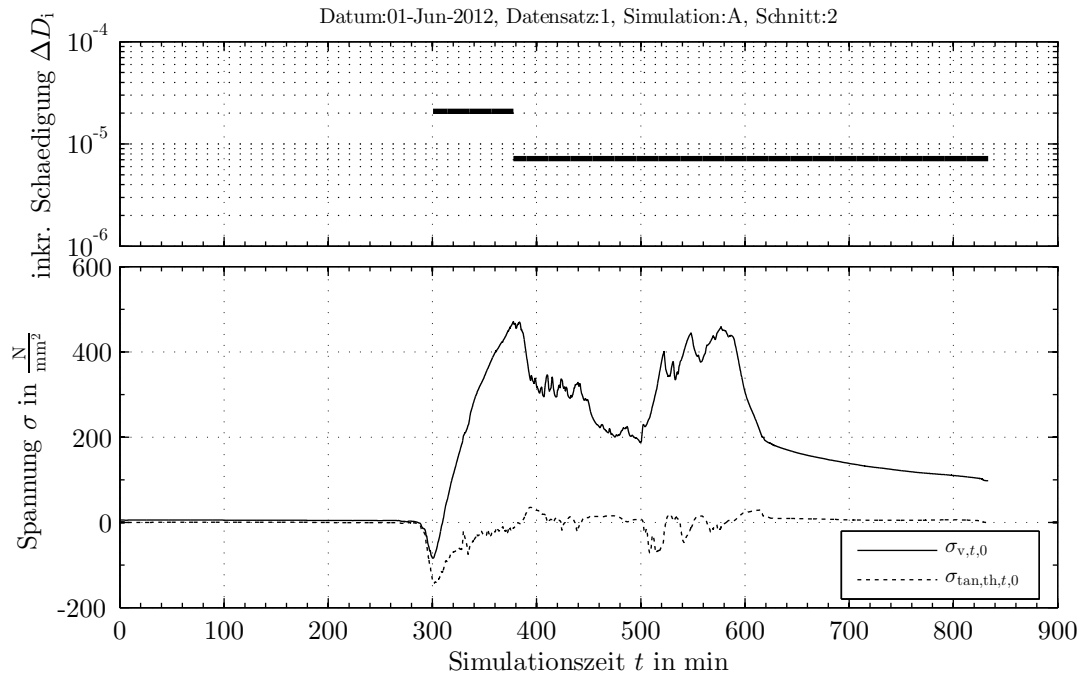


Bild F-1: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 2), 01.06.2012

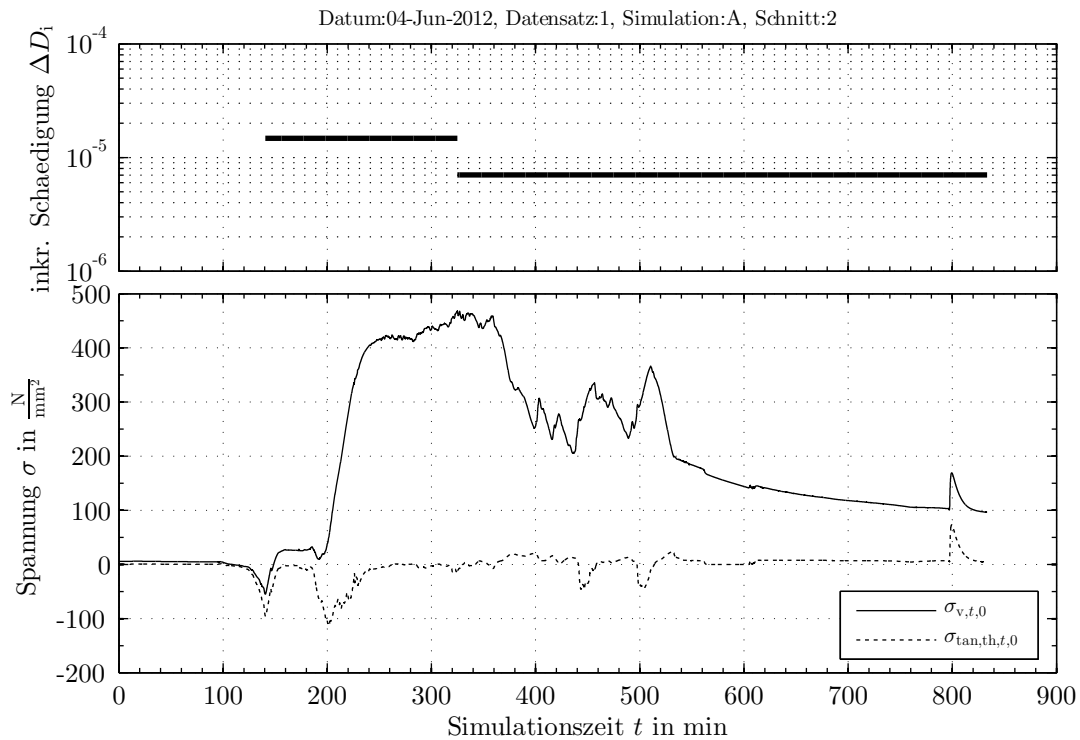
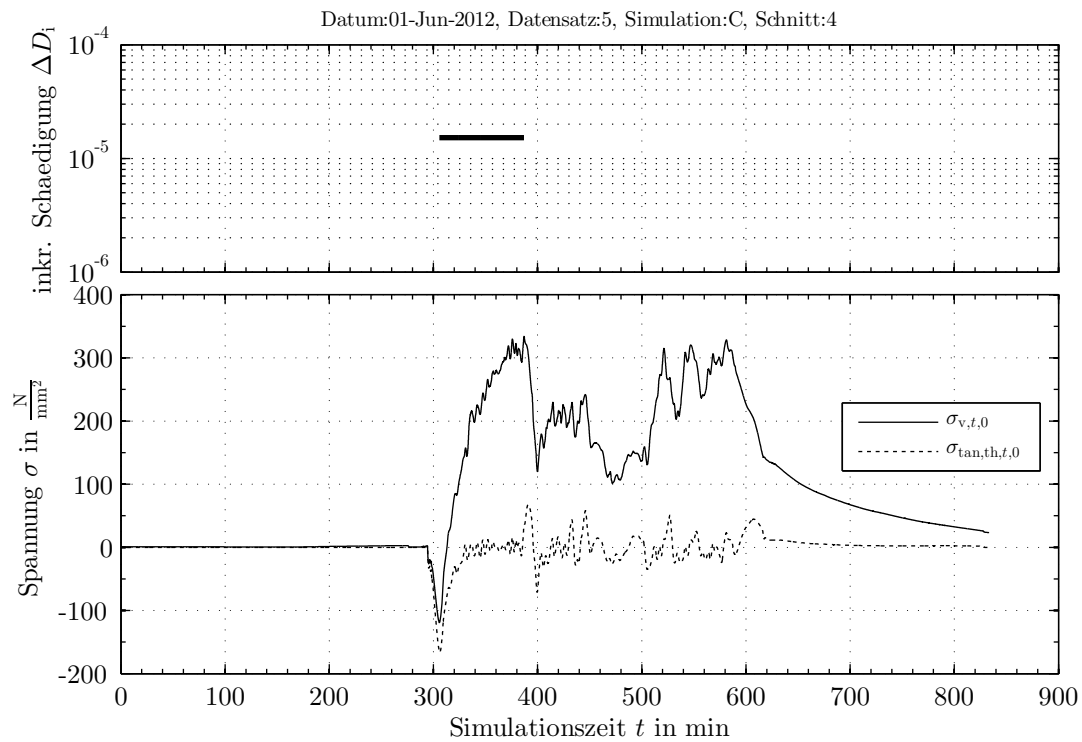
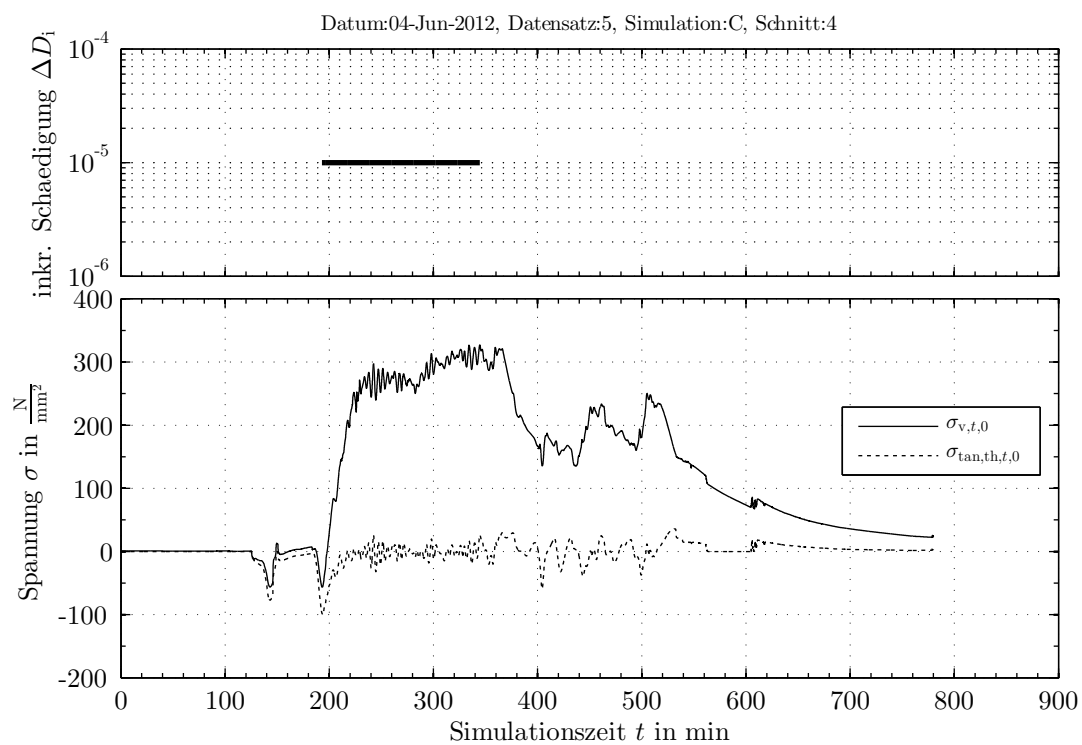


Bild F-2: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 2), 04.06.2012

**Bild F-3:** Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4), 01.06.2012**Bild F-4:** Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4), 04.06.2012

F.2 Mit Variation der Wandstärke

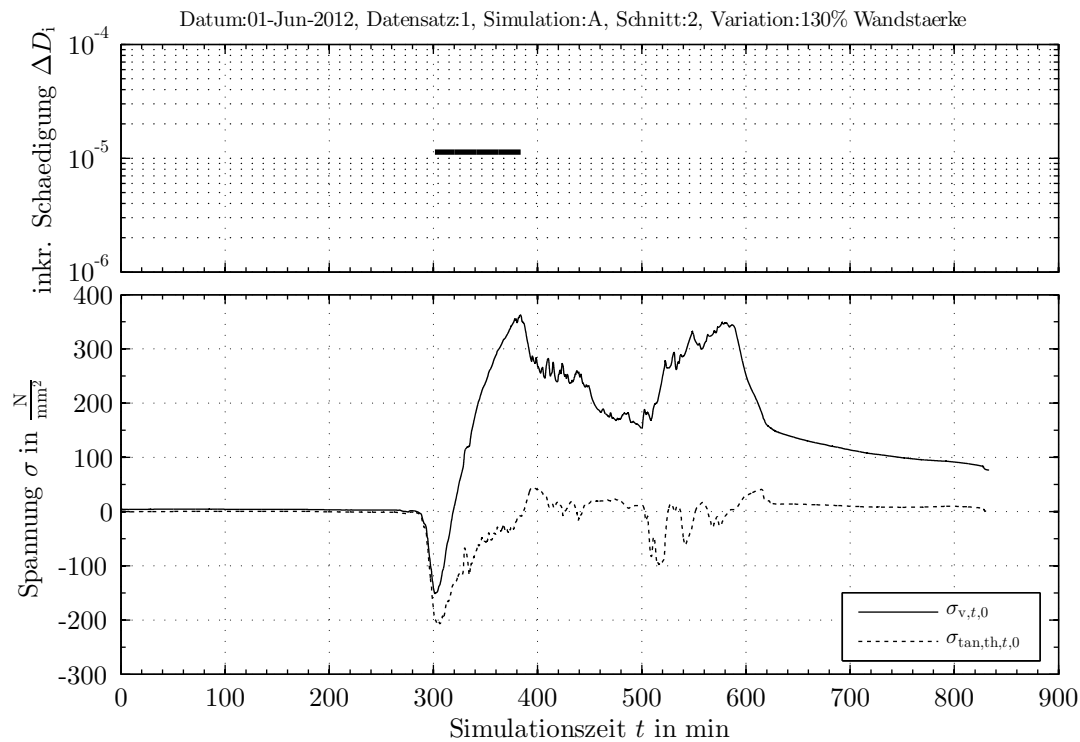


Bild F-5: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 2) mit 130 % Wandstärke am 01.06.2012

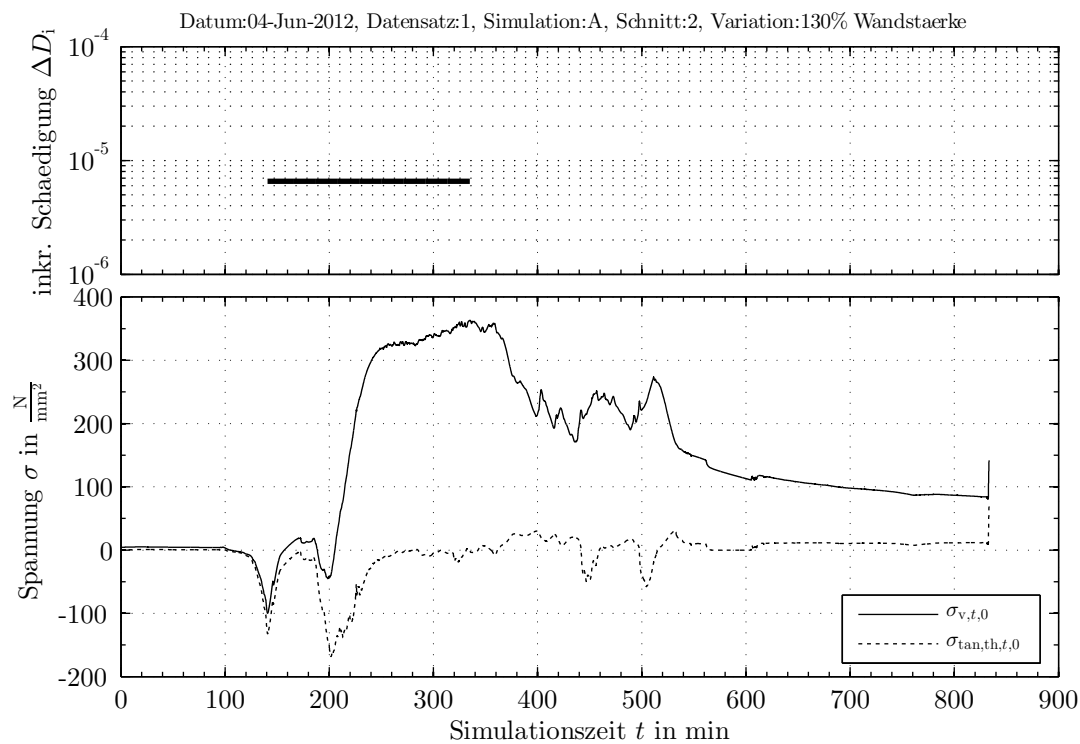


Bild F-6: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 2) mit 130 % Wandstärke am 04.06.2012

F.3 Mit Variation des Innendurchmessers

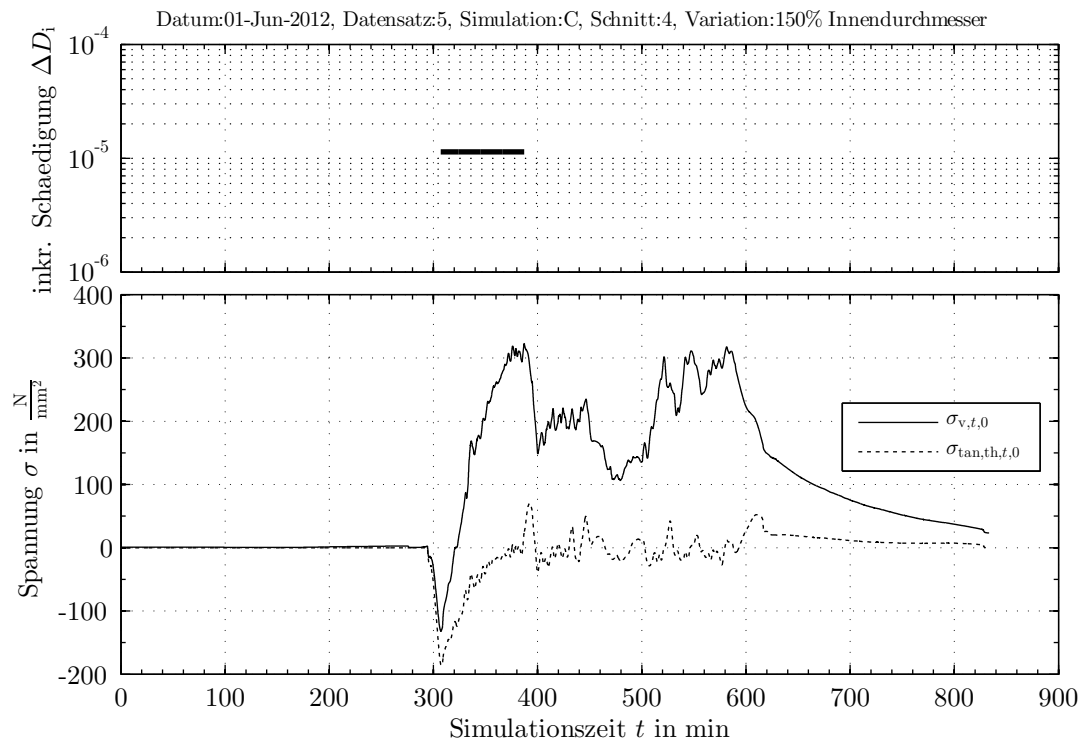


Bild F-7: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit 150% Innendurchmesser am 01.06.2012

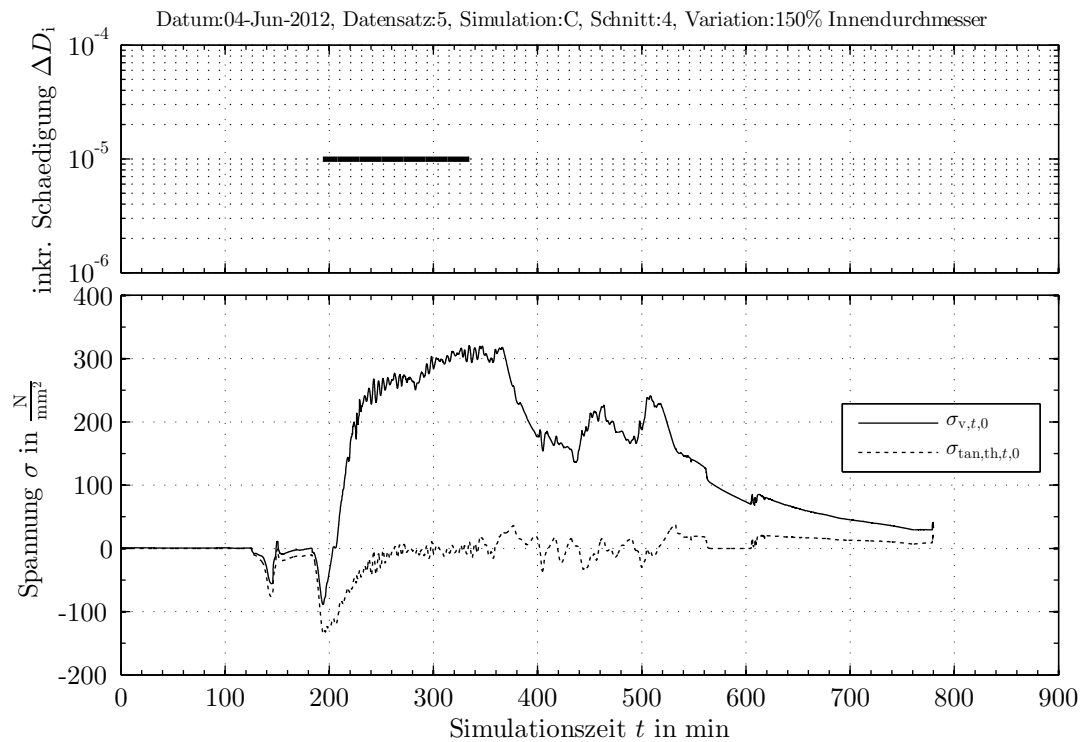


Bild F-8: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit 150% Innendurchmesser am 04.06.2012

F.4 Mit Variation des Wärmeübergangskoeffizienten

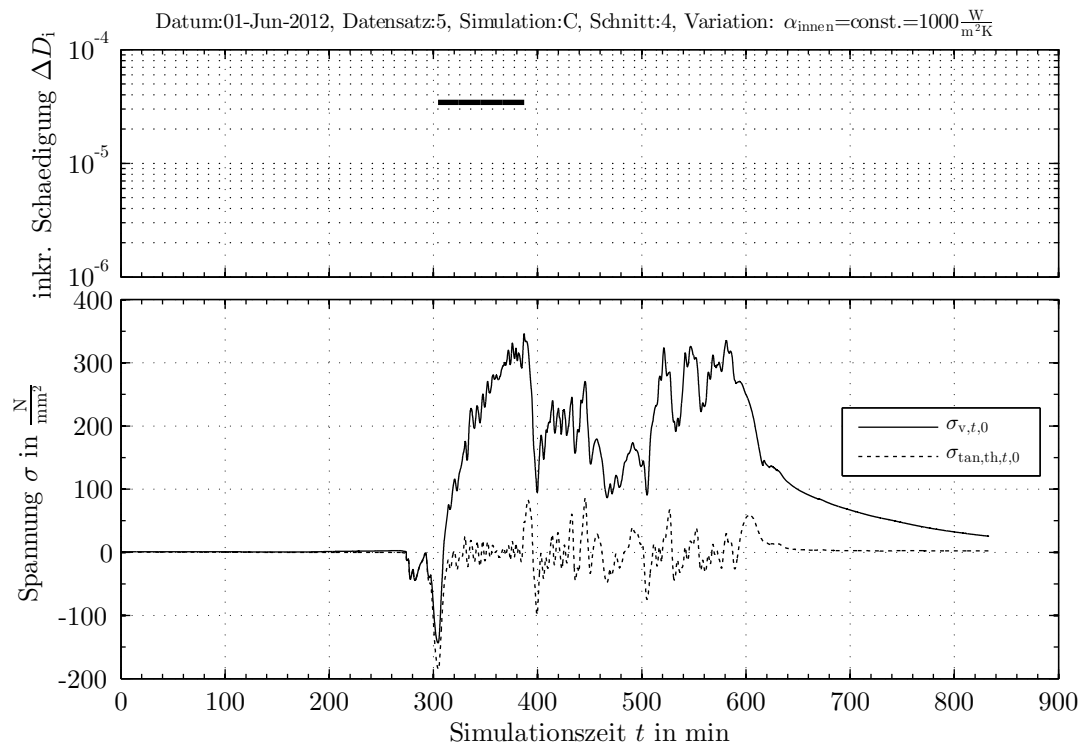


Bild F-9: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten von $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ am 01.06.2012

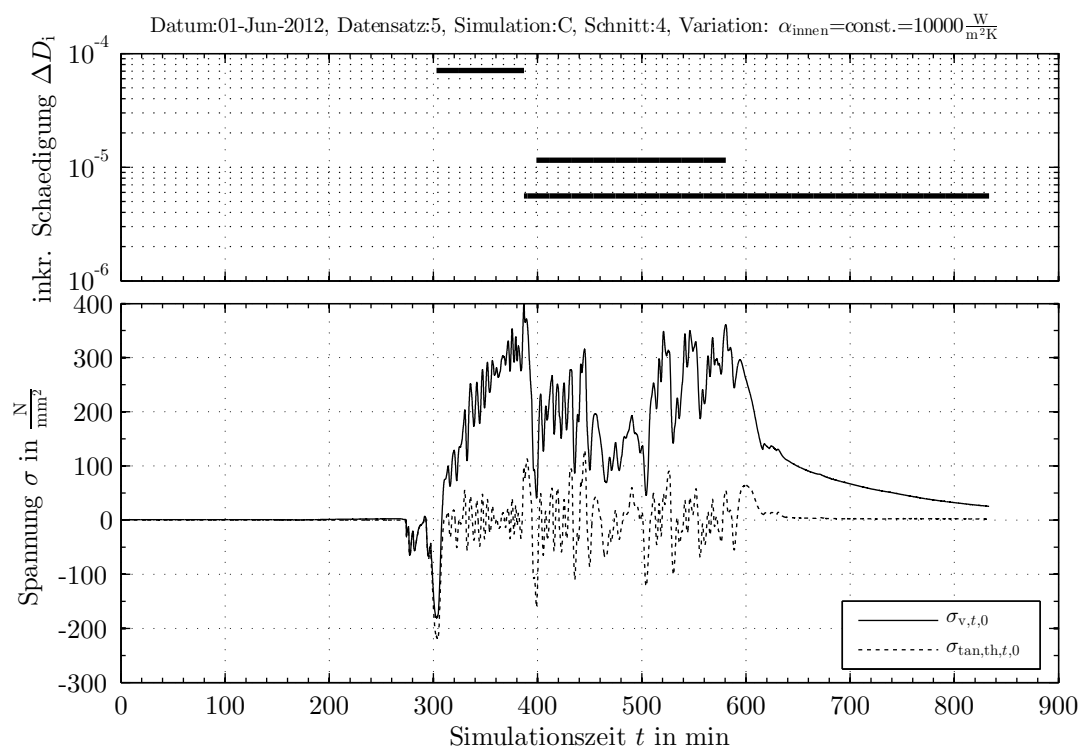


Bild F-10: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für den Überhitzersammler (Schnitt 4) mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten von $10000 \text{ W/m}^2\text{K}$ am 01.06.2012

F.5 Mit Variation der Spannungskonzentrationsfaktoren

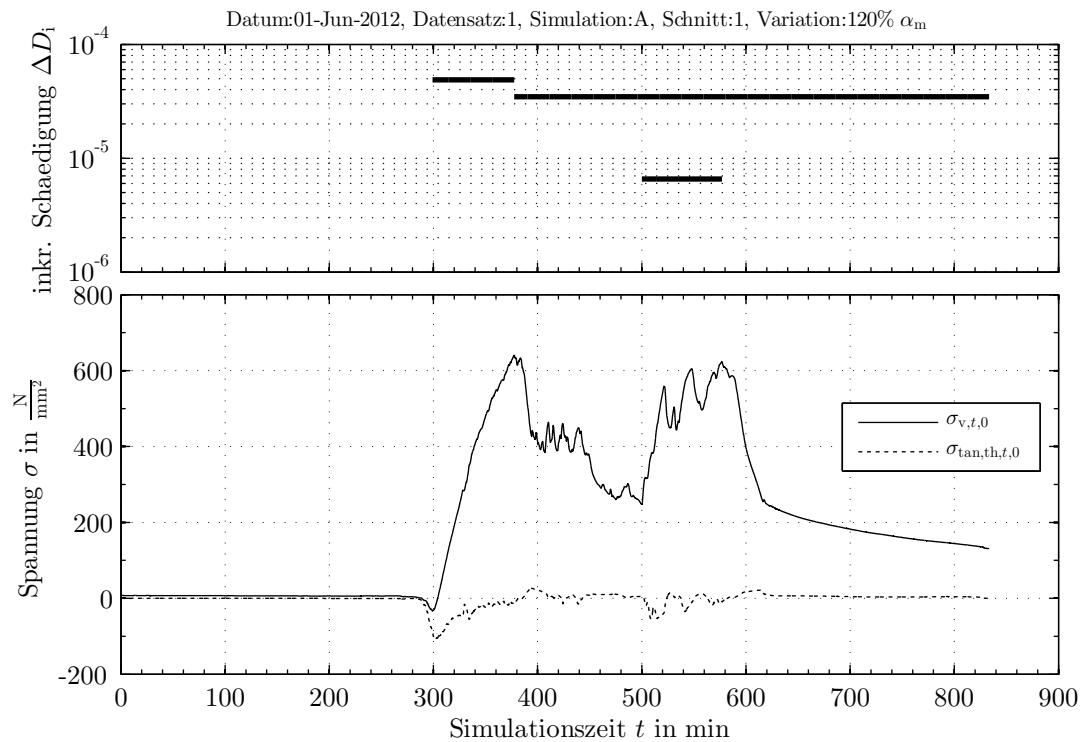


Bild F-11: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 1) mit 20% erhöhtem SKF α_m am 01.06.2012

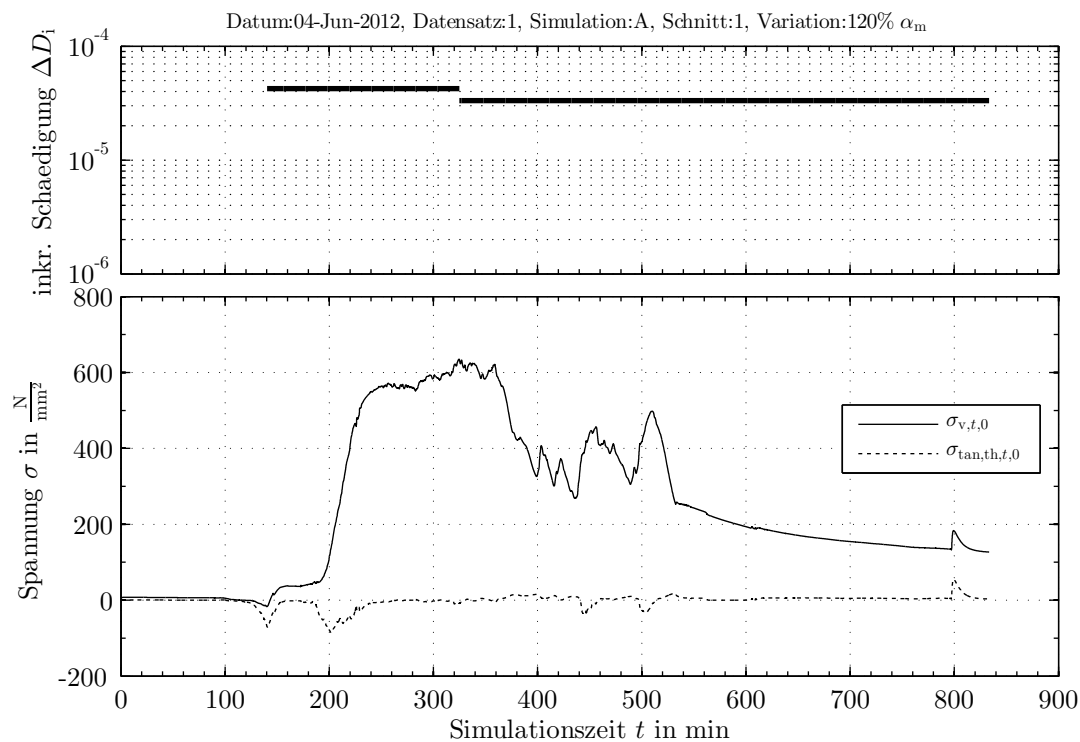


Bild F-12: Schädigungs-/Spannungsdiagramm für die Dampftrömmel (Schnitt 1) mit 20% erhöhtem SKF α_m am 04.06.2012

Anhang G MATLAB Skripte

G.1 Extrahierung und Skalierung der Messdaten

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Titel:                extract_from_measVal
% Version               0.5
% letzte Bearbeitung:   2014-04-16
% Autor:               Joscha Bongardt
% Kontakt:              joscha.bongardt@gmx.de
%
% Software:             Windows 8.1 64-bit, Matlab R2013a
%
% Benötigte Dateien: Rohdaten 'data_JB_tse1_yyyymmdd.mat'
%
%
% Benötigte Workspace Variablen: keine
%
% Beschreibung: extrahier die Messdaten, interpoliert und skaliert sie
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%
%
plot_more = 1;

p_SD_base = 38; % Druck hinter dem Verdampfer (Trommel)
p_SD_scale = 150; % Druck hinter dem Verdampfer (Trommel) für Upscale
Tsatsat_base = XSteam('Tsatsat_p',p_SD_base); % Siedetemperatur
Tsatsat_scale = XSteam('Tsatsat_p',p_SD_scale); % Siedetemperatur für Upscale

p_SH_base = 31; % Druck hinter dem Überhitzer
p_SH_scale = 130;
T_SH_base = 330; % Temp. hinter dem Überhitzer
T_SH_scale = 500;

m_dot_base = 9; % Gesamtdampfmassestrom
n_loop_base = 7;
m_dot_scale = 60;
mscale_m = 1.5; % Massestromverhältnis

% v_vscale = ((XSteam('v_pT',p_uh_scale,T_uh_scale) + XSteam('vV_p',p_tr_scale)) / 2) ...
% / ((XSteam('v_pT',p_uh_base,T_uh_base) + XSteam('vV_p',p_tr_base)) / 2);
%
% m_dot_base_loop = m_dot_base/7; % Massestrom pro Überhitzerstrang
% m_dot_scale_loop = m_dot_base_loop / v_vscale; % Massestrom pro Überhitzerstrang bei gleicher Geschwindigkeit

dh_base_design = XSteam('h_pT',p_SH_base,T_SH_base) - XSteam('hV_p',p_SD_base);
dh_scale_design = XSteam('h_pT',p_SH_scale,T_SH_scale) - XSteam('hV_p',p_SD_scale);

% P_th_base_design = (XSteam('h_pT',p_uh_base,T_uh_base) - XSteam('hV_p',p_tr_base)) * m_dot_base_loop;
% P_th_scale_design = (XSteam('h_pT',p_uh_scale,T_uh_scale) - XSteam('hV_p',p_tr_scale)) * m_dot_scale_loop;
%
test = 1;
dates=[20120501];
%dates = [20120501;20120511;20120521;20120601;20120604];
scale = 1; % 0 = keine Skalierung
sets = [1;2;3;4;5;6];
%set = [1];
% 1: Trommel: Tr-Druck und Temperatur im Dampfraum
% 2: Überhitzer und ÜH-Sammler: FD-Druck und Temperatur in Loop X (statische Skalierung)
% 3: Überhitzer und ÜH-Sammler: FD-Druck und Temperatur in Loop X (Temp.Verhältnis-Skalierung)
% 4: Überhitzer und ÜH-Sammler: FD-Druck und Temperatur in Loop X (Enthalpie-Skalierung)
% 5: Überhitzer-Sammler: FD-Druck und mittlere Looptemperatur (Temp.Verhältnis-Skalierung)
% 6: Überhitzer_Sammler: FD-Druck und FD-Temperatur
% 99: Test

if test == 0
    for m=1:length(dates)

```

```

addpath('K:\DLR\Auswahl_Betriebsdaten 2\');
data_JB = importdata(strcat('data_JB_tse1_',num2str(dates(m))','mat'));

plotvars_druck = zeros(length(data_JB.measVal(:,1)),length(sets));
plotvars_theta = zeros(length(data_JB.measVal(:,1)),length(sets));
plotvars_m = zeros(length(data_JB.measVal(:,1)),length(sets));
plotvars_DNicos = zeros(length(data_JB.measVal(:,1)),length(sets));

for n=1:length(sets)
    dataset = [dates(m);sets(n);scale;p_SD_base;p_SD_scale;Tsat_base;Tsat_scale;p_SH_base;...
        p_SH_scale;T_SH_base;T_SH_scale;m_dot_base;n_loop_base;m_dot_scale;mscale_m;...
        dh_base_design;dh_scale_design];
    dataset_namevars = ['Datum ' ;dataset ' ;scale ' ;p_SD_base ' ;...
        'p_SD_scale';Tsat_base';Tsat_scale';p_SH_base';p_SH_scale';...
        'T_SH_base';T_SH_scale';mdot_base';n_loop_base';mdot_scale';...
        'mscale_m ' ;dh_base_d ' ;dh_scale_d';T_max ' ;p_max '];

    input_druck = zeros(length(data_JB.measVal(:,1)),1);
    input_theta_fluid_innen = zeros(length(data_JB.measVal(:,1)),1);
    input_massenstrom = zeros(length(data_JB.measVal(:,1)),1);
    input_DNicos = zeros(length(data_JB.measVal(:,1)),1);
    time_plot = 0:5/60:(length(data_JB.measVal(:,1))-1)*5/60;

    switch dataset(2)
        case 1 % Trommel: Tr-Druck und Temperatur im Dampfraum
            switch scale
                case 0
                    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,14);
                    input_druck = data_JB.measVal(:,17);
                    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / m_dot_base * m_dot_scale;
                case 1
                    % Skaliert den Druck über das Auslegungsdruckverhältnis an
                    % der Stelle
                    input_druck = data_JB.measVal(:,40) * p_SH_scale / p_SH_base ...
                        + (data_JB.measVal(:,17) - data_JB.measVal(:,40)) * 2.5;

                    % Skaliert die Temperatur anhand des
                    % Siedetemperaturverhältnisses
                    Tsat_b = zeros(length(input_druck),1);
                    Tsat_s = zeros(length(input_druck),1);
                    for i=1:length(input_druck)
                        Tsat_b(i) = XSteam('Tsat_p',data_JB.measVal(i,17));
                        Tsat_s(i) = XSteam('Tsat_p',input_druck(i));
                    end
                    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,14) .* Tsat_s ./ Tsat_b;
                    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / m_dot_base * m_dot_scale;

                    plotvars_druck(:,n) = input_druck;
                    plotvars_theta(:,n) = input_theta_fluid_innen;
                    plotvars_m(:,n) = input_massenstrom;
                end
            end

        case 2 % Überhitzer und ÜH-Sammler: FD-Druck und Temperatur in Loop X (Reihe 25-31) mit statischer Skalierung
            switch scale
                case 0
                    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,25);
                    input_druck = data_JB.measVal(:,40);
                    input_DNicos = data_JB.measVal(:,2);
                    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / n_loop_base * mscale_m;
                case 1
                    % Skaliert den Druck über das Auslegungsdruckverhältnis an
                    % der Stelle
                    input_druck = data_JB.measVal(:,40) * p_SH_scale / p_SH_base ...
                        + (data_JB.measVal(:,17) - data_JB.measVal(:,40)) * 2.5 * 0.2;
                    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,26) + (T_SH_scale-T_SH_base);
                    input_DNicos = data_JB.measVal(:,2);
                    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / n_loop_base * mscale_m;

                    plotvars_druck(:,n) = input_druck;
                    plotvars_theta(:,n) = input_theta_fluid_innen;
                    plotvars_m(:,n) = input_massenstrom;
                    plotvars_DNicos(:,n) = input_DNicos;
                end
            end
        end
    end
end

```


case 3 % Überhitzer und ÜH-Sammler: FD-Druck und Temperatur in Loop X (Reihe 25-31) mit Temperaturverhältnis-Skalierung

```
switch scale
case 0
    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,25);
    input_druck = data_JB.measVal(:,40);
    input_DNicos = data_JB.measVal(:,2);
    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / n_loop_base * mscale_m;
case 1
    % Skaliert den Druck über das Auslegungsdruckverhältnis an
    % der Stelle
    input_druck = data_JB.measVal(:,40) * p_SH_scale / p_SH_base ...
        + (data_JB.measVal(:,17) - data_JB.measVal(:,40)) * 2.5 * 0.2;
    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,26) * T_SH_scale / T_SH_base;
    input_DNicos = data_JB.measVal(:,2);
    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / n_loop_base * mscale_m;

    plotvars_druck(:,n) = input_druck;
    plotvars_theta(:,n) = input_theta_fluid_innen;
    plotvars_m(:,n) = input_massenstrom;
    plotvars_DNicos(:,n) = input_DNicos;
end
```

case 4 % Überhitzer und ÜH-Sammler: FD-Druck und Temperatur in Loop X (Reihe 25-31) mit Enthalpie-Skalierung

```
switch scale
case 0
    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,25);
    input_druck = data_JB.measVal(:,40);
    input_DNicos = data_JB.measVal(:,2);
    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / n_loop_base * mscale_m;
case 1
    % Skaliert den Druck über das Auslegungsdruckverhältnis an
    % der Stelle
    input_druck = data_JB.measVal(:,40) * p_SH_scale / p_SH_base ...
        + (data_JB.measVal(:,17) - data_JB.measVal(:,40)) * 2.5 * 0.2;
    input_theta_fluid_innen = zeros(length(input_druck),1);
    input_DNicos = data_JB.measVal(:,2);
    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / n_loop_base * mscale_m;

    for i=1:length(input_druck)
        % Skalierte Enthalpie
        dh_scale = (XSteam('h_pT',data_JB.measVal(i,40),data_JB.measVal(i,26)) - ...
            XSteam('hV_p',data_JB.measVal(i,24)))...
            * dh_scale_design / dh_base_design;

        if and(isnan(dh_scale)==0,dh_scale>=0)
            % Druck am Verdampferaustritt
            pressure_tr = data_JB.measVal(i,40) * p_SH_scale / p_SH_base ...
                + (data_JB.measVal(i,17) - data_JB.measVal(i,40)) * 2.5;

            h_scale = dh_scale + XSteam('hV_p',pressure_tr);
            input_theta_fluid_innen(i) = XSteam('T_ph',input_druck(i),h_scale);
            % if isnan(input_theta_fluid_innen(i))
            %     data_JB.measVal(i,40)
            %     data_JB.measVal(i,25)
            %     data_JB.measVal(i,24)
            %     data_JB.measVal(i,23)
            %     pressure_tr
            %     h_scale
            %     input_druck(i)
            % end
        else
            input_theta_fluid_innen(i) = data_JB.measVal(i,25);
        end
    end
    plotvars_druck(:,n) = input_druck;
    plotvars_theta(:,n) = input_theta_fluid_innen;
    plotvars_m(:,n) = input_massenstrom;
    plotvars_DNicos(:,n) = input_DNicos;
end
```

case 5 % Überhitzer-Sammler: FD-Druck und mittlere Looptemperatur (Temp.Verhältnis-Skalierung)

```
switch scale
case 0
    input_theta_fluid_innen = (data_JB.measVal(:,25)...
```

```

        +data_JB.measVal(:,26)+data_JB.measVal(:,27)...
        +data_JB.measVal(:,28)+data_JB.measVal(:,29)...
        +data_JB.measVal(:,30)+data_JB.measVal(:,31)) / 7;
    input_druck = data_JB.measVal(:,40);
    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 * mscale_m;
case 1
    % Skaliert den Druck über das Auslegungsdruckverhältnis an
    % der Stelle
    input_druck = data_JB.measVal(:,40) * p_SH_scale / p_SH_base ...
        + (data_JB.measVal(:,17) - data_JB.measVal(:,40)) * 2.5 * 0.2;

    if dataset(1) == 20120501 %SH7 defokussiert
        input_theta_fluid_innen = (data_JB.measVal(:,25)...
            +data_JB.measVal(:,26)+data_JB.measVal(:,27)...
            +data_JB.measVal(:,28)+data_JB.measVal(:,29)...
            +data_JB.measVal(:,30)) / 6 * T_SH_scale / T_SH_base;
    elseif or(dataset(1) == 20120511, dataset(1) == 20120521) %SH1 defokussiert
        input_theta_fluid_innen = (data_JB.measVal(:,26)...
            +data_JB.measVal(:,27)...
            +data_JB.measVal(:,28)+data_JB.measVal(:,29)...
            +data_JB.measVal(:,30)+data_JB.measVal(:,31)) / 6 * T_SH_scale / T_SH_base;
    else % alle SH in Betrieb
        input_theta_fluid_innen = (data_JB.measVal(:,25)...
            +data_JB.measVal(:,26)+data_JB.measVal(:,27)...
            +data_JB.measVal(:,28)+data_JB.measVal(:,29)...
            +data_JB.measVal(:,30)+data_JB.measVal(:,31)) / 7 * T_SH_scale / T_SH_base;
    end
    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / m_dot_base * m_dot_scale;

    plotvars_druck(:,n) = input_druck;
    plotvars_theta(:,n) = input_theta_fluid_innen;
    plotvars_m(:,n) = input_massenstrom;

end

case 6 % Überhitzer_Sammler: FD-Druck und FD-Temperatur
switch scale
case 0
    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,5);
    input_druck = data_JB.measVal(:,40);
    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 * mscale_m;
case 1
    % Skaliert den Druck über das Auslegungsdruckverhältnis an
    % der Stelle
    input_druck = data_JB.measVal(:,40) * p_SH_scale / p_SH_base ...
        + (data_JB.measVal(:,17) - data_JB.measVal(:,40)) * 2.5 * 0.2;
    input_theta_fluid_innen = data_JB.measVal(:,5) * T_SH_scale / T_SH_base;
    input_massenstrom = data_JB.measVal(:,41)/3.6 / m_dot_base * m_dot_scale;

    plotvars_druck(:,n) = input_druck;
    plotvars_theta(:,n) = input_theta_fluid_innen;
    plotvars_m(:,n) = input_massenstrom;

end
end
dataset = [dataset;max(input_theta_fluid_innen);max(input_druck)];

%
% prozessverlauf = figure;
% time_plot = 0:5/60:(length(input_theta_fluid_innen)-1)*5/60;
% % plot(time_plot,input_theta_fluid_innen,'magenta',time_plot,input_pressures,'cyan');
% % plot(time_plot,input_theta_fluid_innen,time_plot,input_pressures,time_plot,input_massflow);
% legend('Theta_f_l_u_i_d_i_n_n_e_n','Druck_i_n_n_e_n','Frischdampf Massenstrom');
% xlabel('Zeit [min]');
% ylabel('Temperatur [°C], Druck [bar]');
% grid on

if dataset(2) <=1
    timeseries = struct('dataset',dataset,'dataset_namevars',dataset_namevars,...
        'input_druck',input_druck,'input_theta_fluid_innen',input_theta_fluid_innen,...
        'input_massenstrom',input_massenstrom,'time_plot',time_plot);
elseif dataset(2) <=4
    timeseries = struct('dataset',dataset,'dataset_namevars',dataset_namevars,...
        'input_druck',input_druck,'input_theta_fluid_innen',input_theta_fluid_innen,...
        'input_massenstrom',input_massenstrom,'input_DNIcos',input_DNIcos,'time_plot',time_plot);

```

```

else
    timeseries = struct('dataset',dataset,'dataset_namevars',dataset_namevars,...
        'input_druck',input_druck,'input_theta_fluid_innen',input_theta_fluid_innen,...
        'input_massenstrom',input_massenstrom,'time_plot',time_plot);
end
save(strcat('timeseries_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(2))),timeseries);

end

% Ausgabe der Drücke
figure
plot(time_plot,plotvars_druck(:,1),'-k',...
    time_plot,plotvars_druck(:,2),'--k');
legend('DT','ÜH und ÜHS');
legend('Location','Best');
xlabel('Zeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Druck [bar]','FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
title(strcat('Skalierte Daten:',datestr(datenum(num2str(dates(m)),'yyyymmdd'))));
saveas(gca,strcat('scale_druck_',num2str(dataset(1)),'.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 10]);
print('-dmeta','-r300',strcat('scale_druck_',num2str(dataset(1))));

% Ausgabe der Trommel und Sammlertemperaturen
figure
subplot(3,1,1);
plot(time_plot,plotvars_theta(:,1),'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
legend('DT');
legend('Location','Best');
% xlabel('Zeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
title(strcat('Skalierte Daten:',datestr(datenum(num2str(dates(m)),'yyyymmdd'))));

subplot(3,1,2);
plot(time_plot,plotvars_theta(:,5),'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
legend('ÜHS_1');
legend('Location','Best');
% xlabel('Zeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
% title(strcat('Datum:',datestr(datenum(num2str(dates(m)),'yyyymmdd'))));

subplot(3,1,3);
plot(time_plot,plotvars_theta(:,6),'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
legend('ÜHS_2');
legend('Location','Best');
xlabel('Zeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
% title(strcat('Datum:',datestr(datenum(num2str(dates(m)),'yyyymmdd'))));
saveas(gca,strcat('scale_theta1_',num2str(dataset(1)),'.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 26]);
print('-dmeta','-r300',strcat('scale_theta1_',num2str(dataset(1))));

% Ausgabe der Überhitzertemperaturen
figure
subplot(3,1,1);
plot(time_plot,plotvars_theta(:,2),'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
legend('ÜH_1');
legend('Location','Best');
% xlabel('Zeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
title(strcat('Datum:',datestr(datenum(num2str(dates(m)),'yyyymmdd'))));

```

```

subplot(3,1,2);
plot(time_plot,plotvars_theta(:,3),'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
legend('ÜH_2');
legend('Location','Best');
% xlabel('Zeit [min]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
ylabel('Temperatur [°C]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
% title(strcat('Datum:', datestr(datenum(num2str(dates(m))), 'yyyymmdd'))));

subplot(3,1,3);
plot(time_plot,plotvars_theta(:,4),'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
legend('ÜH_3');
legend('Location','Best');
xlabel('Zeit [min]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
ylabel('Temperatur [°C]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
% title(strcat('Datum:', datestr(datenum(num2str(dates(m))), 'yyyymmdd'))));
saveas(gca, strcat('scale_theta2_', num2str(dataset(1)), '.fig'));
set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 16 26]);
print('-dmeta', '-r300', strcat('scale_theta2_', num2str(dataset(1))));

% Ausgabe der Massenströme
figure
plot(time_plot, plotvars_m(:,1), '-k', ...
      time_plot, plotvars_m(:,2), '--k', ...
      time_plot, plotvars_m(:,5), '-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
legend('DT', 'ÜH', 'ÜHS');
legend('Location','Best');
xlabel('Zeit [min]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
ylabel('Massenstrom [kg/s]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
title(strcat('Skalierte Daten:', datestr(datenum(num2str(dates(m))), 'yyyymmdd'))));
saveas(gca, strcat('scale_m_', num2str(dataset(1)), '.fig'));
set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 16 10]);
print('-dmeta', '-r300', strcat('scale_m_', num2str(dataset(1))));

% Ausgabe des DNicosphi
figure
plot(time_plot, plotvars_DNicos(:,2), '-k')
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
xlabel('Zeit [min]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
ylabel('DNI_c_o_s_p_h_i [W/m²]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
title(strcat('Skalierte Daten:', datestr(datenum(num2str(dates(m))), 'yyyymmdd'))));
saveas(gca, strcat('scale_DNicos_', num2str(dataset(1)), '.fig'));
set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 16 10]);
print('-dmeta', '-r300', strcat('scale_DNicos_', num2str(dataset(1))));
end

else % Test plot
for dateloop=1:length(dates)

    addpath('K:\DLR\Auswahl_Betriebsdaten 2\');
    data_JB = importdata(strcat('data_JB_tse1_', num2str(dates(dateloop)), '.mat'));

    T_vorTr = data_JB.measVal(:,14);
    T_Tr = data_JB.measVal(:,16);
    T_SH_header = data_JB.measVal(:,23);
    T_LS = data_JB.measVal(:,5);
    T_LS_T = data_JB.measVal(:,38);
    T_SH1 = data_JB.measVal(:,25);
    T_SH2 = data_JB.measVal(:,26);
    T_SH3 = data_JB.measVal(:,27);
    T_SH4 = data_JB.measVal(:,28);
    T_SH5 = data_JB.measVal(:,29);
    T_SH6 = data_JB.measVal(:,30);
    T_SH7 = data_JB.measVal(:,31);

```

```

T_SH_av = (T_SH1+T_SH2+T_SH3+T_SH4+T_SH5+T_SH6+T_SH7)/7;

%T_LS = data_JB.measVal(:,5);

P_vorTr = data_JB.measVal(:,15);
P_Tr = data_JB.measVal(:,17);
P_SH_header = data_JB.measVal(:,24);
P_LS = data_JB.measVal(:,39);
P_LS_T = data_JB.measVal(:,40);

dP_SH = P_Tr - P_LS;

m_LS = data_JB.measVal(:,41)/3.6;
m_bp = data_JB.measVal(:,34)/3.6;

dP_SH_calc = (m_LS / 7).^2 * 7.6;
P_Tr_calc = dP_SH_calc + P_LS;

DNicos = data_JB.measVal(:,2);

P_sat_Tr = zeros(length(T_Tr),1);
T_sat_Tr = zeros(length(T_Tr),1);
for i=1:length(T_Tr)
    P_sat_Tr(i) = XSteam('Psat_t',T_Tr(i));
    T_sat_Tr(i) = XSteam('Tsat_p',P_vorTr(i));
end
delta_P = P_Tr - P_sat_Tr;
delta_T = T_vorTr - T_sat_Tr;

% Verwendete Prozessdaten
figure
time_plot = 0:5/60:(length(T_Tr)-1)*5/60;
plot(time_plot,T_vorTr,'-k',...
     time_plot,T_SH2,'k',...
     time_plot,T_LS,'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
legend('\it\vartheta\rm D_a_m_p_f_t_r_o_m_m_e_l',...
       '\it\vartheta\rm Ü_b_e_r_h_i_t_z_e_r_a_u_s_t_r_i_t_t_,S_t_r_a_n_g_2',...
       '\it\vartheta\rm F_r_i_s_c_h_d_a_m_p_f');
legend('Location','Best');
xlabel('Zeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Temperatur \it\vartheta\rm [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
title(strcat('Messdaten:',datestr(datenum(num2str(dates(dateloop)),'yyyymmdd'))));
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
saveas(gca,strcat('messdaten_theta_',num2str(dates(dateloop)),'.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 10]);
print('-dmeta','-r300',strcat('messdaten_theta_',num2str(dates(dateloop))));

figure
time_plot = 0:5/60:(length(T_Tr)-1)*5/60;
plot(time_plot,P_Tr,'-k',...
     time_plot,P_LS_T,'k',...
     time_plot,m_LS,'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
legend('\itp\rm D_a_m_p_f_t_r_o_m_m_e_l',...
       '\itp\rm F_r_i_s_c_h_d_a_m_p_f','\itmdot\rm F_r_i_s_c_h_d_a_m_p_f');
legend('Location','Best');
xlabel('Zeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Druck \itp\rm [bar], Massenstrom \itmdot\rm [kg/s]','FontSize',10,'FontName','Times');
title(strcat('Messdaten:',datestr(datenum(num2str(dates(dateloop)),'yyyymmdd'))));
set(gca,'YMinorTick','on');
set(gca,'XMinorTick','on');
saveas(gca,strcat('messdaten_druck_',num2str(dates(dateloop)),'.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 10]);
print('-dmeta','-r300',strcat('messdaten_druck_',num2str(dates(dateloop))));

figure
time_plot = 0:5/60:(length(T_Tr)-1)*5/60;
plot(time_plot,DNicos,'-k');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
% legend('DNI_c_o_s_p_h_i');
% legend('Location','Best');
xlabel('Zeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
```

```

ylabel('DNI_c_o_s_p_h_i [W/m²]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
title(strcat('Messdaten:', datestr(datenum(num2str(dates(dateloop))), 'yyyymmdd')));
set(gca, 'YMinorTick', 'on');
set(gca, 'XMinorTick', 'on');
saveas(gca, strcat('messdaten_DNI_', num2str(dates(dateloop)), '.fig'));
set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 16 10]);
print('-dmeta', '-r300', strcat('messdaten_DNI_', num2str(dates(dateloop))));

if plot_more == 1
    figure
    time_plot = -456*60:5:(length(T_Tr)-1)*5-456*60;
    plot(time_plot, DNIcos, '-k', 'LineWidth', 1.5);
    % legend('DNI_c_o_s_p_h_i');
    set(gca, 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
    xlabel('Zeit [s]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
    ylabel('DNI_c_o_s_p_h_i [W/m²]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
    %title(strcat('Datum:', datestr(datenum(num2str(20120601), 'yyyymmdd'))));
    grid on
    xlim([0 120]);
    set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 16 7]);
    print('-dmeta', '-r300', strcat('DNI_120sec'));

    figure
    time_plot = 0:5/60:(length(T_Tr)-1)*5/60;
    plot(time_plot, P_Tr, '-k', ...
        time_plot, P_LS_T, '-k', ...
        time_plot, m_LS, '-k');
    set(gca, 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
    legend('\itp\rm_D_a_m_p_f_t_r_o_m_e_l', ...
        '\itp\rm_F_r_i_s_c_h_d_a_m_p_f', '\itmdot\rm_F_r_i_s_c_h_d_a_m_p_f');
    legend('Location', 'Best');
    xlabel('Zeit [min]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
    ylabel('Druck \itp\rm [bar], Massenstrom \itmdot\rm [kg/s]', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times');
    set(gca, 'YMinorTick', 'on');
    set(gca, 'XMinorTick', 'on');
    % grid on
    xlim([300 600])
    set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 16 8]);
    print('-dmeta', '-r300', strcat('trommeldruck'));

    % Prozesstemperaturen
    figure
    time_plot = 0:5/60:(length(T_Tr)-1)*5/60;
    plot(time_plot, T_vorTr, time_plot, T_Tr, time_plot, T_SH_header, time_plot, T_LS_T, time_plot, T_sat_Tr);
    legend('T_v_o_r_T_r_o_m_m_e_l', 'T_T_r_o_m_m_e_l', 'T_S_H_,_h_e_a_d_e_r', 'T_L_S_,_T', 'T_sat_Tr');
    xlabel('Zeit [min]');
    ylabel('Temperatur [°C]');
    grid on

    % Überhitzertemperaturen
    figure

    plot(time_plot, DNIcos, time_plot, T_SH_header, time_plot, T_SH1, time_plot, T_SH2, time_plot, T_SH3, time_plot, T_SH4, time_pl
ot, T_SH5, time_plot, T_SH6, time_plot, T_SH7, time_plot, T_SH_av, time_plot, T_LS, time_plot, T_LS_T);

    legend('DNIcos', 'T_S_H_,_h_e_a_d_e_r', 'T_S_H_1', 'T_S_H_2', 'T_S_H_3', 'T_S_H_4', 'T_S_H_5', 'T_S_H_6', 'T_S_H_7', 'T_S_H
_,_a_v', 'T_L_S_', 'T_L_S_,_T');
    xlabel('Zeit [min]');
    ylabel('Temperatur [°C], DNI [W/m²]');
    grid on

    % Drücke
    figure

    plot(time_plot, P_vorTr, time_plot, P_Tr, time_plot, P_SH_header, time_plot, P_sat_Tr, time_plot, P_LS, time_plot, P_LS_T, time_pl
ot, delta_P);

    legend('P_v_o_r_T_r_o_m_m_e_l', 'P_T_r_o_m_m_e_l', 'P_S_H_,_h_e_a_d_e_r', 'P_s_a_t_,_T', 'P_L_S_', 'P_L_S_,_T', 'delta_P')
;
    xlabel('Zeit [min]');
    ylabel('Druck [bara]');
    grid on

    figure

```

```

plot(time_plot,P_Tr,time_plot,P_sat_Tr,time_plot,P_LS,time_plot,m_LS,time_plot,m_bp,time_plot,delta_P,time_plot,dP_SH,ti
me_plot,dP_SH_calc,...
time_plot,P_Tr_cale);

legend('P_Tr_o_m_m_e_l','P_s_a_t_,_T_r','P_L_S','m_L_S','m_b_p','delta_P','dP_S_H','dP_S_H_,_c_a_l_c','P_T_r_,_c_a_l_c'
);
    xlabel('Zeit [min]');
    ylabel('Druck [bara]');
    grid on
end
end

end
%%

% clearvars dataset time_plot
clearvars DNIcos P_LS P_LS_T P_SH_header P_Tr P_sat_Tr P_vorTr Tsat_b Tsat_s
clearvars T_LS T_LS_T T_SH1 T_SH2 T_SH3 T_SH4 T_SH5 T_SH6 T_SH7 T_SH_av T_SH_base T_SH_header
clearvars T_SH_scale T_Tr T_vorTr Tsat_base Tsat_scale delta_P dh_base_design dh_scale_design
clearvars i m_LS m_bp m_dot_base m_dot_scale mscale_m n_loop_base
clearvars p_SH_base p_SH_scale p_SD_base p_SD_scale
clearvars dh_scale h_scale j m n pressure_tr scale set

```

G.2 Erzeugung der Regressionspolynome für die Materialeigenschaften

```

%%
% #####
% Titel: materialkennwerte
% Version: 1.0
% letzte Bearbeitung: 2014-04-11
% Autor: Joscha Bongardt
% Kontakt: joscha.bongardt@gmx.de
%
% Erstellt auf: Windows 8.1 64-bit, Matlab R2013a
%
% Benötigte Dateien: keine
%
% Benötigte Workspace Variablen: keine
%
% Ausgabevariablen: material.mat
%
% Beschreibung:
% Erzeugt die Regressionspolynome für 15NiCuMoNb,10CrMo,X10CrMoVNb für
% - Emodul
% - Temperaturleitfähigkeit
% - Wärmeleitkoeffizient
% - differentieller Wärmeausdehnungskoeffizient
%
%#####

plot_einzel_diag = 0;

label_1 = '15NiCuMoNb5-6-4';
Rp_theta_1 = [401 388 377 366 355 342 328 309];
theta_rp_1 = (100:50:450);
Rm_theta_1E5_1 = 0.8 * [373 349 325 300 273 245 210 175 139 104 69];
theta_rm_t_1 = (400:10:500);

label_2 = 'X10CrMoVNb9-1';
Rp_theta_2 = [410 395 380 370 360 350 340 320 300 270 215];
theta_rp_2 = (100:50:600);
Rm_theta_1E5_2 = 0.8 * [258 239 220 201 183 166 150 134 120 106 94 83 73 65 56 49 42];
Rm_theta_2E5_2 = 0.8 * [245 225 206 188 170 153 136 121 106 93 81 71 63 56 49 43 36]; % nach VdTÜV 511/2
theta_rm_t_2 = (500:10:660);

label_3 = '10CrMo9-10';
Rp_theta_3 = [249 241 234 224 219 212 207 193 180];
theta_rp_3 = (100:50:500);
Rm_theta_1E5_3 = 0.8 * [229 212 194 177 160 141 124 105 95 81 70 61 53 46 40 35];
Rm_theta_2E5_3 = 0.8 * [204 188 172 156 140 124 108 94 80 68 57 49 43 38 33 28];
theta_rm_t_3 = (450:10:600);

% X12CrCoWMoVNb12-2-2
% Rp_theta_4 = [420 412 405 400 392 382 372 360 340 300 248];
% theta_rp_4 = (100:50:600);
% Rm_theta_1E5_4 = [162 145 130 115 102 90 78 68];
% theta_rm_t_4 = (550:10:620);

temp = [20 100 200 300 400 500 600];
temp_reg = (20:10:600);

lambda = zeros(3,7);
beta = zeros(3,7);
hcap = zeros(3,7);
rho = zeros(3,7);
Emod = zeros(3,7);
aleit = zeros(3,7);

aleit_reg = zeros(3,length(temp_reg));
lambda_reg = zeros(3,length(temp_reg));
betadiff_reg = zeros(3,length(temp_reg));
Emod_reg = zeros(3,length(temp_reg));

lambda(1,:) = [46.3 47.1 46.2 44.1 41.3 38.6 35.8]; % Gruppe 4
lambda(2,:) = [23.3 23.6 24.3 25.5 25.7 26.0 26.5]; % Gruppe 6 (12Cr1MoV)
lambda(3,:) = [37.0 37.4 37.2 36.5 35.0 33.2 31.0]; % Gruppe 5.2

```



```

beta(1,:) = [11.3 12.47 13.71 14.69 15.41 15.88 16.09] * 1E-6;
beta(2,:) = [10.32 11.1 11.94 12.63 13.16 13.55 13.79] * 1E-6;
beta(3,:) = beta(1,:);

beta20(1,:) = [0 11.9 12.6 13.1 13.7 14.1 14.4] * 1E-6;
beta20(2,:) = [0 10.7 11.2 11.6 11.9 12.2 12.5] * 1E-6;
beta20(3,:) = beta20(1,:);

hcap(1,:) = [461 496 533 568 611 677 778];
hcap(2,:) = [439 500 534 571 625 704 831];
hcap(3,:) = hcap(1,:);

Emod(1,:) = [212 206 198 191 183 174 165] * 1E3;
Emod(2,:) = [214 211 205 197 188 178 168] * 1E3;
Emod(3,:) = Emod(1,:);

rho(1,:) = 7850 ./ (1+beta20(1,:).* (temp-20)).^3;
rho(2,:) = 7760 ./ (1+beta20(2,:).* (temp-20)).^3;
rho(3,:) = rho(1,:);

for i=1:3
    aleit(i,:) = lambda(i,:) ./ (rho(i,:) * hcap(i,:));
end

%*****
% Berechnung der Polynomkoeffizienten
%*****
aleit_poly_1 = polyfit(temp,aleit(1,:),3);
aleit_poly_2 = polyfit(temp,aleit(2,:),5);
aleit_poly_3 = polyfit(temp,aleit(3,:),3);

lambda_poly_1 = polyfit(temp,lambda(1,:),3);
lambda_poly_2 = polyfit(temp,lambda(2,:),3);
lambda_poly_3 = polyfit(temp,lambda(3,:),3);

betadiff_poly_1 = polyfit(temp,beta(1,:),3);
betadiff_poly_2 = polyfit(temp,beta(2,:),3);
betadiff_poly_3 = polyfit(temp,beta(3,:),3);

Emod_poly_1 = polyfit(temp,Emod(1,:),3);
Emod_poly_2 = polyfit(temp,Emod(2,:),3);
Emod_poly_3 = polyfit(temp,Emod(3,:),3);

%*****
% Erstellung der Polynome zur graphischen Kontrolle
%*****
aleit_reg(1,:) = polyval(aleit_poly_1,temp_reg);
aleit_reg(2,:) = polyval(aleit_poly_2,temp_reg);
aleit_reg(3,:) = polyval(aleit_poly_3,temp_reg);

lambda_reg(1,:) = polyval(lambda_poly_1,temp_reg);
lambda_reg(2,:) = polyval(lambda_poly_2,temp_reg);
lambda_reg(3,:) = polyval(lambda_poly_3,temp_reg);

betadiff_reg(1,:) = polyval(betadiff_poly_1,temp_reg);
betadiff_reg(2,:) = polyval(betadiff_poly_2,temp_reg);
betadiff_reg(3,:) = polyval(betadiff_poly_3,temp_reg);

Emod_reg(1,:) = polyval(Emod_poly_1,temp_reg);
Emod_reg(2,:) = polyval(Emod_poly_2,temp_reg);
Emod_reg(3,:) = polyval(Emod_poly_3,temp_reg);

mat_aleit_poly_15NiCuMoNb = aleit_poly_1;
mat_aleit_poly_X10CrMoVNb = aleit_poly_2;
mat_aleit_poly_10CrMo = aleit_poly_3;

mat_lambda_poly_15NiCuMoNb = lambda_poly_1;
mat_lambda_poly_X10CrMoVNb = lambda_poly_2;
mat_lambda_poly_10CrMo = lambda_poly_3;

mat_betadiff_poly_15NiCuMoNb = betadiff_poly_1;
mat_betadiff_poly_X10CrMoVNb = betadiff_poly_2;
mat_betadiff_poly_10CrMo = betadiff_poly_3;

```

```

mat_Emod_poly_15NiCuMoNb = Emod_poly_1;
mat_Emod_poly_X10CrMoVNb = Emod_poly_2;
mat_Emod_poly_10CrMo = Emod_poly_3;

save('material','mat_aleit_poly_15NiCuMoNb','mat_aleit_poly_X10CrMoVNb','mat_aleit_poly_10CrMo',...
    'mat_lambda_poly_15NiCuMoNb','mat_lambda_poly_X10CrMoVNb','mat_lambda_poly_10CrMo',...
    'mat_betadiff_poly_15NiCuMoNb','mat_betadiff_poly_X10CrMoVNb','mat_betadiff_poly_10CrMo',...
    'mat_Emod_poly_15NiCuMoNb','mat_Emod_poly_X10CrMoVNb','mat_Emod_poly_10CrMo');

%
% save('mat_aleit_poly_15NiCuMo','mat_aleit_poly');
% save('mat_aleit_poly_X10CrMoVN','mat_aleit_poly');
% save('mat_aleit_poly_10CrMo','mat_aleit_poly');
%
% save('mat_lambda_poly_15NiCuMo','mat_lambda_poly');
% save('mat_lambda_poly_X10CrMoVN','mat_lambda_poly');
% save('mat_lambda_poly_10CrMo','mat_lambda_poly');
%
%
% save('mat_betadiff_poly_15NiCuMo','mat_betadiff_poly');
% save('mat_betadiff_poly_X10CrMoVN','mat_betadiff_poly');
% save('mat_betadiff_poly_10CrMo','mat_betadiff_poly');
%
% save('mat_Emod_poly_15NiCuMo','mat_Emod_poly');
% save('mat_Emod_poly_X10CrMoVN','mat_Emod_poly');
% save('mat_Emod_poly_10CrMo','mat_Emod_poly');

if plot_einzel_diag == 1
    %*****
    % Diagramm für die Temperaturleitfähigkeit
    %*****
    figure
    plot(temp,aleit(1:),'ok',...
        temp,aleit(2:),'+k',...
        temp,aleit(3:),'*k',...
        'LineWidth',1,'MarkerSize',8);
    hold on
    plot(temp_reg,aleit_reg(1:),'-k',...
        temp_reg,aleit_reg(2:),'-k',...
        temp_reg,aleit_reg(3:),'-k');
    hold off
    grid on
    set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
    legend(label_1,label_2,label_3);
    xlabel('\vartheta [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
    ylabel('Temperaturleitfähigkeit a [m²/s]','FontSize',10,'FontName','Times');
    saveas(gca,'mat_Temperaturleitfähigkeit.fig');
    set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 12]);
    print('-dmeta','-r300','mat_Temperaturleitfähigkeit');

    %*****
    % Diagramm für die Wärmeleitfähigkeit
    %*****
    figure
    plot(temp,lambda(1:),'ok',...
        temp,lambda(2:),'+k',...
        temp,lambda(3:),'*k',...
        'LineWidth',1,'MarkerSize',8);
    hold on
    plot(temp_reg,lambda_reg(1:),'-k',...
        temp_reg,lambda_reg(2:),'-k',...
        temp_reg,lambda_reg(3:),'-k');
    hold off
    grid on
    set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
    legend(label_1,label_2,label_3);
    xlabel('\vartheta [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
    ylabel('Wärmeleitfähigkeit \lambda [W/m/K]','FontSize',10,'FontName','Times');
    saveas(gca,'mat_Wärmeleitfähigkeit.fig');
    set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 12]);
    print('-dmeta','-r300','mat_Wärmeleitfähigkeit');

    %*****
    % Diagramm für die Ausdehnungskoeffizient

```

```

%*****
figure
plot(temp,beta(1:),'ok',...
      temp,beta(2:),'+k',...
      temp,beta(3:),'*k',...
      'LineWidth',1,'MarkerSize',8);
hold on
plot(temp_reg,betadiff_reg(1:),'-k',...
      temp_reg,betadiff_reg(2:),'-k',...
      temp_reg,betadiff_reg(3:),'-k');
hold off
grid on
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
legend(label_1,label_2,label_3);
xlabel('\vartheta [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('diff. Ausdehnungskoeffizient \beta_d_i_f [1/K]','FontSize',10,'FontName','Times');
saveas(gca,'mat_betadiff.fig');
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 12]);
print('-dmeta','-r300','mat_betadiff');

%*****
% Diagramm für den E-Modul
%*****
figure
plot(temp,Emod(1:),'ok',...
      temp,Emod(2:),'+k',...
      temp,Emod(3:),'*k',...
      'LineWidth',1,'MarkerSize',8);
hold on
plot(temp_reg,Emod_reg(1:),'-k',...
      temp_reg,Emod_reg(2:),'-k',...
      temp_reg,Emod_reg(3:),'-k');
hold off
grid on
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
legend(label_1,label_2,label_3);
xlabel('\vartheta [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('E-Modul [N/mm²]','FontSize',10,'FontName','Times');
saveas(gca,'mat_Emod.fig');
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 12]);
print('-dmeta','-r300','mat_Emod');
end

%*****
% Diagramm für die Festigkeitswerte
%*****
figure
plot(theta_rp_1,Rp_theta_1,'-ok',...
      theta_rp_2,Rp_theta_2,'+k',...
      theta_rp_3,Rp_theta_3,'*k',...
      theta_rm_t_1,Rm_theta_1E5_1,'--ok',...
      theta_rm_t_2,Rm_theta_2E5_2,'--+k',...
      theta_rm_t_3,Rm_theta_2E5_3,'--*k');
grid on
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
legend(strcat('\itR\rm_p_0_2_\it\vartheta\rm: ',label_1),...
      strcat('\itR\rm_p_0_2_\it\vartheta\rm: ',label_2),...
      strcat('\itR\rm_p_0_2_\it\vartheta\rm: ',label_3),...
      strcat('\itR\rm_m_1_E_5_\it\vartheta\rm: ',label_1),...
      strcat('\itR\rm_m_2_E_5_\it\vartheta\rm: ',label_2),...
      strcat('\itR\rm_m_2_E_5_\it\vartheta\rm: ',label_3),...
      'Location','SouthWest');
xlabel('\it\vartheta\rm [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('\itR\rm_p_0_2_\it\vartheta\rm,\it\rm_m_\it_t\rm_\it\vartheta\rm, [N/mm²]','FontSize',10,'FontName','Times');
saveas(gca,'mat_Festigkeitswerte.fig');
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 12]);
print('-dmeta','-r300','mat_Festigkeitswerte');

%*****
% Gesamtplot
%*****
figure
subplot(2,2,1)
plot(temp,aleit(1:),'ok',...
      temp,aleit(2:),'+k',...
      temp,aleit(3:),'*k',...

```

```

'LineWidth',1,'MarkerSize',8);
hold on
plot(temp_reg,aleit_reg(1:),'-k',...
      temp_reg,aleit_reg(2:),'-k',...
      temp_reg,aleit_reg(3:),'-k');
hold off
grid on
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
xlabel('\it\vartheta\rm [^\circ C]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Temperaturleitf\u00e4higkeit \it a\rm [m^2/s]','FontSize',10,'FontName','Times');

subplot(2,2,2)
plot(temp,lamba(1:),'ok',...
      temp,lamba(2:),'+k',...
      temp,lamba(3:),'*k',...
      'LineWidth',1,'MarkerSize',8);
hold on
plot(temp_reg,lamba_reg(1:),'-k',...
      temp_reg,lamba_reg(2:),'-k',...
      temp_reg,lamba_reg(3:),'-k');
hold off
grid on
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
xlabel('\it\vartheta\rm [^\circ C]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('W\u00e4rmeleitf\u00e4higkeit \it \lambda\rm [W/m/K]','FontSize',10,'FontName','Times');

subplot(2,2,3)
plot(temp,beta(1:),'ok',...
      temp,beta(2:),'+k',...
      temp,beta(3:),'*k',...
      'LineWidth',1,'MarkerSize',8);
hold on
plot(temp_reg,betadiff_reg(1:),'-k',...
      temp_reg,betadiff_reg(2:),'-k',...
      temp_reg,betadiff_reg(3:),'-k');
hold off
grid on
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
xlabel('\it\vartheta\rm [^\circ C]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('diff. Ausdehnungskoeffizient \it \beta\rm d_i_f_f\rm [1/K]','FontSize',10,'FontName','Times');

subplot(2,2,4)
plot(temp,Emod(1:),'ok',...
      temp,Emod(2:),'+k',...
      temp,Emod(3:),'*k',...
      'LineWidth',1,'MarkerSize',8);
hold on
plot(temp_reg,Emod_reg(1:),'-k',...
      temp_reg,Emod_reg(2:),'-k',...
      temp_reg,Emod_reg(3:),'-k');
hold off
grid on
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
xlabel('\it\vartheta\rm [^\circ C]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('E-Modul [N/mm^2]','FontSize',10,'FontName','Times');

legend(label_1,label_2,label_3,'Orientation','horizontal','Location',[0.275 0 0.5 0.05]);
%legend('boxoff');

saveas(gca,'mat_Eigenschaft_phys.fig');
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 20]);
print('-dmeta','-r300','mat_Eigenschaft_phys');
```

G.3 Wandtemperatursimulation

```

%%
% #####
% Titel: walltemp
% Version 1.1
% letzte Bearbeitung: 2014-04-11
% Autor: Joscha Bongardt
% Kontakt: joscha.bongardt@gmx.de
%
% Erstellt auf: Windows 8.1 64-bit, Matlab R2013a
%
% Benötigte Dateien:
% für Test: keine
% ansonsten:
% - Zeitreihen in 'timeseries.mat' (output aus extract_from_measVal.mat)
% - Materialdaten aus 'material.mat' (output aus Materialkennwerte.mat)
%
% Benötigte Workspace Variablen:
% keine
%
% Ausgabevariablen:
% wenn keine Test: simulation_X_yyyymmdd_ds_x.mat
%
%
% Beschreibung: Berechnet die 1-dimensionale Wandtemperatur eines
% zylindrischen Bauteils diskretisiert über dem Radius und der Zeit
%
% #####

%%
% *****
% Deklarationen
% *****

testcase = 0;
% 0 = Einlesen der Temperaturdaten
% 1 = einseitige Sprungantwort
% 2 = einseitige Rampe
% 3 = Sprungantwort Strahlung
% 98 = Diskretisierungsprüfung (Konv/Konv)
% 99 = Diskretisierungsprüfung (Iso/Flux)
variation = 6;
% 0 = Basisresultate
% 1 = Variation SKF alpha_m
% 2 = Variation SKF alpha_t
% 3 = Variation Wärmeübergangskoeffizient
% 4 = Variation konstanter Wärmeübergangskoeffizient
% 5 = Variation der Wandstärke
% 6 = Variation des Zeitversatzes
% 7 = Variation des Innendurchmessers

if testcase == 0
    d_time = 1; % Zeitschrittweite in Sekunden
    wandst_steps = 50; % Anzahl der Diskretisierungsschritte über dem Radius
    zeta = 0.5; % FD-Verfahren: 0=explizit, 0.5=crank-nicolson, 1=implizit
    % Deklaration der Konstanten für Simulation
    d_time_measVal = 5; % Interval der Messdatenerfassung
    timespan = 50000; % 50399; % Laufzeit der Simulation in Sekunden
    % timespan = length(timeseries.input_theta_fluid_innen) * d_time_measVal / d_time - 1;
    d_time_write_walltemps = 1; % Intervall für Datenausgabe in Sekunden

    % sims = [2];
    % dates = 20120501;
    sims = [1,2,3,4,5];
    dates = [20120501;20120511;20120521;20120601;20120604];
else
    d_time = 1;
    zeta = 0.5;
    timespan = 6000;
    d_time_write_walltemps = 1;
    sims = 1;
    dates = 1;
    ds = 1;
    mat = 2;
    wandst = 100/1000;

```

```

    d_radius = 1/1000;
    radius_innen = 1;
end

switch variation
case 0
    savepathstr = "";
    vartitle = "";
    varnum1 = 1;
case 3 % Variation mit Skalierungsfaktor auf alpha_innen
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_simulation_var_alphai\';
    vartitle = '_var_alphai';
    varnum1 = [0.5 1.5 2 3 4]; % Skaliert den berechneten Wärmeübergangskoeffizienten
case 4 % Variation mit konstanten alpha_innen
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_simulation_var_alphai\';
    vartitle = '_var_alphaconst';
    varnum1 = [100 1000 10000]; % legt den konstanten Wärmeübergangskoeffizienten fest
case 5 % Variation der Wandstärke
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_simulation_var_wandst\';
    vartitle = '_var_wandst';
    varnum1 = [2.0]; % [1.1 1.2 1.3]; % legt den konstanten Wärmeübergangskoeffizienten fest
case 6 % Variation des Zeitversatzes zwischen Druck und Temperatur
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_simulation_var_timeshift\';
    vartitle = '_var_tshift';
    varnum1 = [120]; % [-60 -30 -15 15 30 60]; % legt den Zeitversatz in Sekunden fest (ts>0 Druck eilt vor; ts<0 Temp eilt
vor)
case 7 % Variation des Innendurchmessers
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_simulation_var_di\';
    vartitle = '_var_di';
    varnum1 = [1.1 1.2 1.3 1.4 1.5];
end

for varloop=1:length(varnum1)

    switch variation
    case 0
        alpha_scale = 1;
        ts = 0;
        vartitle_file = "";
        vartitle_diag = "";
    case 3
        alpha_scale = varnum1(varloop);
        ts = 0;
        vartitle_diag = strcat(' Variation:', num2str(varnum1(varloop)*100), '% \alpha_i_n_n_e_n');
        vartitle_file = strcat(vartitle, num2str(varnum1(varloop)*100));
    case 4
        alpha_scale = 1;
        ts = 0;
        alpha_cond = varnum1(varloop);
        vartitle_diag = strcat(' Variation: \alpha_i_n_n_e_n=const.', num2str(varnum1(varloop)), 'W/m²/K');
        vartitle_file = strcat(vartitle, num2str(varnum1(varloop)));
    case 5
        alpha_scale = 1;
        ts = 0;
        vartitle_diag = strcat(' Variation:', num2str(varnum1(varloop)*100), '% Wandstärke');
        vartitle_file = strcat(vartitle, num2str(varnum1(varloop)*100));
    case 6
        alpha_scale = 1;
        vartitle_diag = strcat(' Variation:', num2str(varnum1(varloop)), 's Zeitversatz');
        vartitle_file = strcat(vartitle, num2str(varnum1(varloop)));
    case 7
        alpha_scale = 1;
        ts = 0;
        vartitle_diag = strcat(' Variation:', num2str(varnum1(varloop)*100), '% Innendurchmesser');
        vartitle_file = strcat(vartitle, num2str(varnum1(varloop)*100));
    end

    for dateloop=1:length(dates)
        for simloop=1:length(sims)

            %*****
            % Auswahl des Schnittes
            %*****
            if testcase == 0
                switch sims(simloop)
                case 1 % Dampftrommel

```

```

simstr = 'A';
simtitle = strrep(simstr, '_', '');
wandst = 75/1000; % Wandstärke in Metern
d_radius = wandst/wandst_steps; % Radiusschrittweite in Metern
radius_innen = 0.9; % Innerer Radius in Metern (0=Vollzylinder)
mat = 1; % Material (1=15NiCuMoNb5-6-4, 2=X10CrMoVNb9-1, 3=P235GH/P355GH, 4=X 22
CrMoV12.1)
if not(variation == 4)
    alpha_cond = -2; % x = alpha konstant x W/m²/K; -1= alpha ohne Konvektion; -2= alpha mit Konvektion
end
randb_innen = 1; % Randbedingung innen (0=Isolation bei Vollzylinder; 1=Konvektion)
randb_aussen = 1; % Randbedingung außen (1=Konvektion; 2=Strahlung)
ds = 1; % Datensatz
% cleared for calculation

case 2 % FD-Sammler 1. Loop
simstr = 'B';
simtitle = strrep(simstr, '_', '');
wandst = 6.5/1000;
d_radius = wandst/wandst_steps;
radius_innen = 28.5/1000;
mat = 2;
if not(variation == 4)
    alpha_cond = -1;
end
randb_innen = 1;
randb_aussen = 1;
if variation == 0
    ds = [2;3;4;5;6]; %2=Temp.differenz, 3=Temp.verhältnis, 4=Enthalpieverh. %5=mittlere Looptemp.,
else
    ds = 3;
end
% cleared for calculation

case 3 % FD-Sammler letzter Loop
simstr = 'C';
simtitle = strrep(simstr, '_', '');
wandst = 32/1000;
d_radius = wandst/wandst_steps;
radius_innen = 0.2;
mat = 2;
if not(variation == 4)
    alpha_cond = -1;
end
randb_innen = 1;
randb_aussen = 1;
if variation == 0
    ds = [5;6]; %5=mittlere Looptemp., 6=FD-Temp
else
    ds = 5;
end
% cleared for calculation

case 4 % FD-Leitung
simstr = 'D';
simtitle = strrep(simstr, '_', '');
wandst = 30/1000;
d_radius = wandst/wandst_steps;
radius_innen = 0.15;
mat = 2;
if not(variation == 4)
    alpha_cond = -1;
end
randb_innen = 1;
randb_aussen = 1;
if variation == 0
    ds = [5;6]; %5=mittlere Looptemp., 6=FD-Temp
else
    ds = 5;
end
% cleared for calculation

case 5 % Receiver Ferrit
simstr = 'E';
simtitle = strrep(simstr, '_', '');
wandst = 6.5/1000;

```

```

    d_radius = wandst/wandst_steps;
    radius_innen = 28.5/1000;
    mat = 2;
    if not(variation == 4)
        alpha_cond = -1;
    end
    randb_innen = 1;
    randb_aussen = 2;
    apertur = 4.6; % Aperturweite des Kollektors in Metern
    eta_kollektor = 0.72; % Kollektorgesamtwirkungsgrad
    if variation == 0
        ds = [2;3;4]; %2=Temp.differenz, 3=Temp.verhältnis, 4=Enthalpieverh.
    else
        ds = 3;
    end
    % cleared for calculation
end

switch variation
case 5
    wandst = wandst * varnum1(varloop);
    d_radius = wandst/wandst_steps;
case 6
    ts = varnum1(varloop); % Zeitversatz in Sekunden (ts>0 Druck eilt vor; ts<0 Temp eilt vor)
case 7
    wandst = wandst * varnum1(varloop);
    d_radius = wandst/wandst_steps;
    radius_innen = radius_innen * varnum1(varloop);
end
end

for dsloop=1:length(ds)
    tic
    if testcase == 0
        timeseries = importdata(strcat('timeseries_',num2str(dates(datesloop)), '_ds_',num2str(ds(dsloop)),'.mat'));
        dataset =
[dates(datesloop);ds(dsloop);wandst;radius_innen;mat;alpha_cond;alpha_scale;randb_innen;randb_aussen;...
    d_time;d_time_write_walltemps;d_radius;ts];
        dataset_namevars = ['date ', 'dataset ', 'wandstaerke';...
            'radius_inne'; 'material ', 'alpha_cond ', 'alpha_scale'; 'randb_innen'; 'randb_ausse';...
            'd_time ', 'd_time_writ'; 'd_radius ', 'Zeitverschb'];
    end

    %%
    %*****
    % Materialdaten
    %*****
    load('material.mat');
    switch mat % nach DIN 12952-3
    case 1 % 15NiCuMoNb5-6-4 (Gruppe 4.2)
        a_wand_poly = mat_aleit_poly_15NiCuMoNb;
        lambda_wand_poly = mat_lambda_poly_15NiCuMoNb;
    case 2 % X10CrMoVNb9-1 (Gruppe 6.4)
        a_wand_poly = mat_aleit_poly_X10CrMoVNb;
        lambda_wand_poly = mat_lambda_poly_X10CrMoVNb;

    case 3 % Ferrit Gruppe 1, 2.1, 4, 5.1, 5.2
        a_wand_poly = [-1.22364E-8 1.54318E-5];
        lambda_wand_poly = [-1.298E-5 -2.464E-2 55.72];
    case 4 % Ferrit Gruppe 6
        a_wand_poly = [-4.57422E-9 7.28613E-6];
        lambda_wand_poly = [0.00193 25.04459];
    end

    %%
    %*****
    % Deklaration der Hilfsfunktionen und Variablen
    %*****
    time_plot = (0:d_time_write_walltemps/60:timespan/60);
    n_radius = floor(wandst/d_radius); % Anzahl der Schritte über Radius
    n = n_radius-1;
    radius_aussen = radius_innen + wandst;
    radius_plot = (radius_innen*1000:d_radius*1000:radius_aussen*1000);
    % Vektor für die Darstellung des Radius bei der graphischen Ausgabe

    Beta = zeros(6,1);

```



```

Lambda = zeros(5,1);
Lambda_plus = zeros(5,1);
Gplus = @(ii) (2+d_radius/(radius_innen+ii*d_radius));
Gminus = @(ii) (2-d_radius/(radius_innen+ii*d_radius));
writecount = 0; % Zähler für das Schreiben der Wandtemperaturen
writestep = 2; % Zähler für Position in Ausgabefeld

% Initialisierung der Vektoren
K_neben_unten = ones(n-1,1); % untere Nebendiagonale der Koeffizientenmatrix
K_neben_oben = ones(n-1,1); % obere Nebendiagonale der Koeffizientenmatrix
K_haupt = ones(n,1); % Hauptdiagonale der Koeffizientenmatrix
F = zeros(n,1); % Lastvektor
wall_temps = zeros(floor(timespan/d_time_write_walltemps),n+2);
% Ausgabefeld für Wandtemperature über Radius und Zeit

%%
%*****
% Deklarationen und Einlesen der Variablen für Programmablauf oder -test
%*****
switch testcase
case 0 % Lastfall 0: Einlesen der Zeitreihen, Interpolation und Festlegung der Randbedingungen

    U = ones(n,1) * timeseries.input_theta_fluid_innen(1); % Anfangsbedingung
    wall_temps(1,:) = [U(1); U; U(n)];

    % Interpolation von Innentemperatur, Innendruckes und Massenstrom
    if d_time==d_time_measVal % bei gleicher Schrittweite erfolgt keine Interpolation
        theta_fluid_innen = timeseries.input_theta_fluid_innen;
        pressures = timeseries.input_druck;
        massenstrom = timeseries.input_massenstrom;
    else
        theta_fluid_innen = zeros(timespan/d_time+1,1);
        pressures = zeros(timespan/d_time+1,1);
        massenstrom = zeros(timespan/d_time+1,1);

        for i=1:timespan/d_time+1 %length(timeseries.input_theta_fluid_innen)/d_time*d_time_measVal
            theta_fluid_innen(i)=...
                interp1(0:d_time_measVal:length(timeseries.input_theta_fluid_innen)...
                    *d_time_measVal-1,timeseries.input_theta_fluid_innen,(i-1)*d_time,'parchip');
            pressures(i) = interp1(0:d_time_measVal:length(timeseries.input_druck)...
                *d_time_measVal-1,timeseries.input_druck,(i-1)*d_time,'parchip');
            massenstrom(i)=...
                interp1(0:d_time_measVal:length(timeseries.input_massenstrom)...
                    *d_time_measVal-1,timeseries.input_massenstrom,(i-1)*d_time,'parchip');
        end
    end

    if ts < 0 % Temperatur eilt voraus (Temperatur wird vorne abgeschnitten)
        theta_fluid_innen = [theta_fluid_innen(floor(abs(ts)/d_time)+1:end);...
            ones(floor(abs(ts)/d_time),1)*theta_fluid_innen(end)];
    elseif ts > 0 % Druck eilt voraus (Temperatur wird hinten abgeschnitten)
        theta_fluid_innen = [ones(floor(abs(ts)/d_time),1)*theta_fluid_innen(1);...
            theta_fluid_innen(1:end-floor(abs(ts)/d_time)+1)];
    end

    switch randb_innen
    case 0
    case 1
        alpha_innen = zeros(timespan/d_time+1,1);
        % Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten
        if alpha_cond >= 0
            alpha_innen = (alpha_innen + 1) * alpha_cond;
            % Wärmeübergangskoeffizient innen in W/m²/K

        elseif alpha_cond == -1 % Wärmeübergangskoeffizient für Überhitzten Dampf
            % Deklaration der Variablen für Wärmeübergangskoeffizienten
            v = zeros(timespan/d_time+1,1); % spez. Volumen
            ny = zeros(timespan/d_time+1,1); % kin. Viskosität
            lambda_fluid = zeros(timespan/d_time+1,1); % Wärmeleitkoeffizient
            heatcap_fluid = zeros(timespan/d_time+1,1); % isobare Wärmekapazität
            l = 100; %Überhitzerlänge

            for i=1:length(massenstrom)
                v(i) = XSteam('v_pT',pressures(i)+1,theta_fluid_innen(i));
                ny(i) = XSteam('my_pT',pressures(i)+1,theta_fluid_innen(i)) * v(i);
                lambda_fluid(i) = XSteam('tc_pT',pressures(i)+1,theta_fluid_innen(i));
            end
        end
    end
end

```

```

        heatcap_fluid(i) = XSteam('Cp_pT',pressures(i)+1,theta_fluid_innen(i)) * 1000;
    end

    if sims(simloop)==2 && or(ds(dsloop)==5,ds(dsloop)==6)
        % Sonderfall, da Datensatz 5 und 6 den
        % vollen FD-Fassenstrom enthalten
        w_fluid = massenstrom .* v / (radius_innen^2 * pi) / 7;
    else
        w_fluid = massenstrom .* v / (radius_innen^2 * pi);
    end
    Re = w_fluid * 2 * radius_innen ./ ny;
    Pr = ny .* heatcap_fluid ./ v ./ lambda_fluid;
    alpha_innen = alpha_scale * 0.0214 *
(1+2.3*2*radius_innen/l).*Re.^0.8.*Pr.^(1/3).*lambda_fluid/(2*radius_innen); % Mac Adams für Überhitzer

elseif alpha_cond == -2 % Wärmeübergangskoeffizient für Nassdampfgebiet mit Kondensation

    rho = zeros(timespan/d_time+1,1); % Dichte
    ny = zeros(timespan/d_time+1,1); % kin. Viskosität
    lambda_fluid = zeros(timespan/d_time+1,1); % Wärmeleitkoeffizient
    heatcap_fluid = zeros(timespan/d_time+1,1); % isobare Wärmekapazität
    theta_sat = zeros(timespan/d_time+1,1); % Sattedampftemperatur
    r = zeros(timespan/d_time+1,1); % Verdampfungsenthalpie
    x = 0.97; % Dampfgehalt im Dampfraum
    aa = 0.5; % Strömungsquerschnitt
    l_hydr = 4 * radius_innen^2 * pi / 2 / (radius_innen * pi + 2 * radius_innen); % hydraulischer
Durchmesser

    l_kond = 0.5 * radius_innen; % Wandhöhe bei Filmkondensation
    h = 2; % Länge der Konvektionsstrecke

    for i=1:length(massenstrom)
        rho(i) = XSteam('rho_ph',pressures(i)+1,XSteam('h_px',pressures(i)+1,x));
        ny(i) = XSteam('ny_pT',pressures(i)+1,XSteam('Tsat_p',pressures(i)+1.1)) / rho(i);
        lambda_fluid(i) = XSteam('tc_ph',pressures(i)+1,XSteam('h_px',pressures(i)+1,x));
        heatcap_fluid(i) = XSteam('CpV_p',pressures(i)+1) * 1000;
        theta_sat(i) = XSteam('Tsat_p',pressures(i)+1);
        r(i) = (XSteam('hV_p',pressures(i)+1)-XSteam('hL_p',pressures(i)+1));
    end

    w_fluid = massenstrom ./ rho / (radius_innen^2 * pi) / aa;
    Re = w_fluid * 2 * l_hydr ./ ny;
    Pr = ny .* heatcap_fluid .* rho ./ lambda_fluid;
end
end

switch randb_aussen
case 1
    % Wärmeübergangskoeffizient und Temperatur aussen in W/m²/K
    alpha_aussen = ones(timespan/d_time+1,1)...
        * 3.8 * 20 / (max(theta_fluid_innen) - 40);
    theta_fluid_aussen = ones(timespan/d_time+1,1)*40; % Außentemperatur
case 2
    % Berechnung und Interpolation der Bestrahlungsleistung
    if d_time==d_time_measVal % bei gleicher Schrittweite erfolgt keine Interpolation
        q_dot_aussen = timeseries.input_DNicos * apertur / (radius_innen + wandst) / pi * eta_kollektor;
    else
        q_dot_aussen = zeros(timespan/d_time+1,1);
        for i=1:timespan/d_time+1
            q_dot_aussen(i)=...
                interp1(0:d_time_measVal:length(timeseries.input_DNicos)...
                    * d_time_measVal-1,timeseries.input_DNicos,(i-1)*d_time,'parchip')...
                    * apertur / (radius_innen + wandst) / pi * eta_kollektor;
        end
    end
end

theta_fluid_plot = zeros(length(time_plot),2);
alpha_plot = zeros(length(time_plot),2);
massenstrom_plot = zeros(length(time_plot),1);
pressures_plot = zeros(length(time_plot),1);
q_dot_aussen_plot = zeros(length(time_plot),1);

pressures_plot(1) = pressures(1);
if randb_aussen == 1
    theta_fluid_plot(1,2) = theta_fluid_aussen(1);
    massenstrom_plot(1) = massenstrom(1);

```

```

elseif randb_aussen == 2
    theta_fluid_plot(1,2) = 0;
end

if randb_innen == 1
    theta_fluid_plot(1,1) = theta_fluid_innen(1);
    massenstrom_plot(1) = massenstrom(1);
elseif randb_innen == 0
    theta_fluid_plot(1,1) = 0;
end

case 1 % Testfall 1: Sprungantwort (Konvektion/Konvektion)
    randb_innen = 1;
    randb_aussen = 1;

    U = ones(n,1) * 40; % Anfangsbedingung
    wall_temps(1,:) = [U(1); U; U(n)];

    theta_fluid_innen = ones(1,timespan/d_time+1)*100;
    theta_fluid_aussen = ones(1,timespan/d_time+1)*40;

    alpha_innen = ones(1,timespan/d_time+1) * 1000;
    % Wärmeübergangskoeffizient innen in W/m²/K
    alpha_aussen = ones(1,timespan/d_time+1) * 100;
    % 3.8; % Wärmeübergangskoeffizient aussen in W/m²/K

    theta_fluid_plot = zeros(length(time_plot),2);
    theta_fluid_plot(1,1) = theta_fluid_innen(1);
    theta_fluid_plot(1,2) = theta_fluid_aussen(1);

case 2 % Testfall 2: Rampe (Konvektion/Konvektion)
    randb_innen = 1;
    randb_aussen = 1;

    U = ones(n,1) * 40; % Anfangsbedingung
    wall_temps(1,:) = [U(1); U; U(n)];

    theta_fluid_innen = cat(2,(40:4/60*d_time:140),...
        ones(1,timespan*d_time+1)*140);
    theta_fluid_aussen = ones(1,timespan/d_time+1)*40; % (0:50:600);

    alpha_innen = ones(1,timespan/d_time+1) * 1000;
    % Wärmeübergangskoeffizient innen in W/m²/K
    alpha_aussen = ones(1,timespan/d_time+1) * 100;
    % 3.8; % Wärmeübergangskoeffizient aussen in W/m²/K

    theta_fluid_plot = zeros(length(time_plot),2);
    theta_fluid_plot(1,1) = theta_fluid_innen(1);
    theta_fluid_plot(1,2) = theta_fluid_aussen(1);

case 3 % Testfall 3: Sprungantwort (Konvektion/Strahlung)
    randb_innen = 1;
    randb_aussen = 2;

    U = ones(n,1) * 40; % Anfangsbedingung
    wall_temps(1,:) = [U(1); U; U(n)];

    theta_fluid_innen = ones(1,timespan/d_time+1) * 40;
    q_dot_aussen = ones(1,timespan/d_time+1) * 10000;

    alpha_innen = ones(1,timespan/d_time+1) * 1000;
    % Wärmeübergangskoeffizient innen in W/m²/

    theta_fluid_plot = zeros(length(time_plot),1);
    theta_fluid_plot(1,1) = theta_fluid_innen(1);

case 98 % Testfall 98: Diskretisierungsprüfung (Konv/Kon)
    randb_innen = 1;
    randb_aussen = 1;

    U = ones(n,1) * 40; % Anfangsbedingung
    wall_temps(1,:) = [U(1); U; U(n)];
    t0 = U(1);

    theta_fluid_innen = ones(1,timespan/d_time+1)*100;

```

```

theta_fluid_aussen = ones(1,timespan/d_time+1)*40;

alpha_innen = ones(1,timespan/d_time+1) * 1000;
alpha_aussen = ones(1,timespan/d_time+1) * 100;

theta_fluid_plot = zeros(length(time_plot),2);
theta_fluid_plot(1,1) = theta_fluid_innen(1);
theta_fluid_plot(1,2) = theta_fluid_aussen(1);

a_wand_poly = a_wand_poly(end);
lambda_wand_poly = lambda_wand_poly(end);

case 99 % Testfall 99: Diskretisierungsprüfung (Iso/Flux)

randb_innen = 0;
randb_aussen = 2;

U = ones(n,1) * 40; % Anfangsbedingung
wall_temps(1,:) = [U(1); U; U(n)];
t0 = U(1);

q_dot_aussen = ones(1,timespan/d_time+1) * 10000;

a_wand_poly = a_wand_poly(end);
lambda_wand_poly = lambda_wand_poly(end);
end

%*****
% Berechnungsbeginn
%*****
% Schleife für Gleichungslöser
for timestep = 1:timespan/d_time
    %%
    % Berechnung der Koeffizienten
    %*****
    a_wand_mittel = polyval(a_wand_poly,mean(U));
    lambda_wand_mittel = polyval(lambda_wand_poly,mean(U));

    Beta(1) = (1-zeta)*a_wand_mittel / (2*d_radius.^2);
    Beta(2) = (d_radius.^2 - 2*(1-zeta)*a_wand_mittel*d_time) / ...
        (d_time*d_radius.^2);
    Beta(3) = zeta*a_wand_mittel / (2*d_radius.^2);
    Beta(4) = (-(d_radius.^2)-2*zeta*a_wand_mittel*d_time) / ...
        (d_time*d_radius.^2);

    if testcase == 0
        if alpha_cond == -2
            if theta_sat(timestep) < U(1) % Konvektion
                alpha_1 = lambda_fluid(timestep)/l_hydr*0.012...
                    * (Re(timestep)^0.87-280)*Pr(timestep)^0.4*(1+(l_hydr/h)^(2/3))...
                    * ((theta_fluid_innen(timestep)+273.15)/(U(1)+273.15))^0.18; % Hausen und Gnielinski
                if alpha_1 < 0
                    alpha_1 = 0;
                end
            else % Kondensation
                alpha_1 = 0.003*(lambda_fluid(timestep)^3 * 9.81...
                    * l_kond * (theta_sat(timestep)-U(1)) / (rho(timestep)...
                    * ny(timestep)^3 * r(timestep)))^0.5;
            end

            if theta_sat(timestep+1) < U(1)
                alpha_2 = lambda_fluid(timestep+1)/l_hydr*0.012...
                    * (Re(timestep+1)^0.87-280)*Pr(timestep+1)^0.4*(1+(l_hydr/h)^(2/3))...
                    * ((theta_fluid_innen(timestep+1)+273.15)/(U(1)+273.15))^0.18;
                if alpha_2 < 0
                    alpha_2 = 0;
                end
            else % Kondensation
                alpha_2 = 0.003*(lambda_fluid(timestep+1)^3 * 9.81...
                    * l_kond * (theta_sat(timestep+1)-U(1)) / (rho(timestep+1)...
                    * ny(timestep+1)^3 * r(timestep+1)))^0.5;
            end
        end
        alpha_innen(timestep) = alpha_scale * (alpha_1 + alpha_2) / 2;
        alpha_innen(timestep+1) = alpha_scale * (alpha_1 + alpha_2) / 2;
    end
end

```

```

    if timestep==1
        if randb_innen == 1
            alpha_plot(1,1) = alpha_innen(1);
        end
        if randb_aussen == 1
            alpha_plot(1,2) = alpha_aussen(1);
        end
    end
end

switch randb_innen
    case 1
        Lambda(1) = lambda_wand_mittel /...
            (alpha_innen(timestep)*radius_innen *...
            log((radius_innen+d_radius)/...
            /radius_innen)+lambda_wand_mittel);
        Lambda(2) = 1 / (1+(lambda_wand_mittel /...
            (alpha_innen(timestep)*radius_innen *...
            log((radius_innen+d_radius)/radius_innen))));
        Lambda_plus(1) = lambda_wand_mittel /...
            (alpha_innen(timestep+1)*radius_innen *...
            log((radius_innen+d_radius)/...
            radius_innen)+lambda_wand_mittel);
        Lambda_plus(2) = 1 / (1+(lambda_wand_mittel /...
            (alpha_innen(timestep+1)*radius_innen *...
            log((radius_innen+d_radius)/radius_innen))));
    end
switch randb_aussen
    case 1 %Konvektion
        Lambda(3) = lambda_wand_mittel /...
            (alpha_aussen(timestep)*radius_aussen*...
            log(radius_aussen/...
            (radius_aussen-d_radius))+lambda_wand_mittel);
        Lambda(4) = 1 / (1+(lambda_wand_mittel /...
            (alpha_aussen(timestep)*radius_aussen*log(radius_aussen/...
            (radius_aussen-d_radius))));
        Lambda_plus(3) = lambda_wand_mittel /...
            (alpha_aussen(timestep+1)*radius_aussen *...
            log(radius_aussen /...
            (radius_aussen-d_radius))+lambda_wand_mittel);
        Lambda_plus(4) = 1 / (1+(lambda_wand_mittel /...
            (alpha_aussen(timestep+1)*radius_aussen*log(radius_aussen/...
            (radius_aussen-d_radius))));
    case 2 %Strahlung
        Lambda(5) = radius_aussen*log(radius_aussen/...
            (radius_aussen-d_radius)) / lambda_wand_mittel;
    end

%%
%*****
% Erstellung der Koeffizientenmatrix
%*****

for i = 1:n-1 % Deklaration der Nebendiagonalen
    K_neben_unten(i) = Beta(3) * Gminus(i+1); % beta3*Gamma+
    K_neben_oben(i) = Beta(3) * Gplus(i); % beta3*Gamma-
end

for i = 1:n % Deklaration der Hauptdiagonale
    K_haupt(i) = Beta(4); %beta4
end

switch randb_innen
    case 0 % Isolation bei Vollzylinder
        K_haupt(1) = K_haupt(1)...
            + Beta(3) * Gminus(1);
    case 1 % Konvektion
        K_haupt(1) = K_haupt(1)...
            + Beta(3) * Gminus(1) * Lambda_plus(1);
    end
switch randb_aussen
    case 1 % Konvektion
        K_haupt(n) = K_haupt(n)...
            + Beta(3) * Gplus(n) * Lambda_plus(3);

```

```

    case 2 % Strahlung
        K_haupt(n) = K_haupt(n)...
            + Beta(3) * Gplus(n);
    end
    K = diag(K_neben_unten,-1) + diag(K_haupt) + diag(K_neben_oben,1);

    %%
    % Erstellung des Lastvektors
    switch randb_innen
    case 0 % Isolation bei Vollzylinder
        F(1) = -(Beta(2) + Beta(1) * Gminus(1)) * U(1)...
            - Beta(1) * Gplus(1) * U(2);
    case 1 % Konvektion
        F(1) = -(Beta(2)+Beta(1)*Gminus(1)*Lambda(1)) * U(1)...
            - Beta(1)*Gplus(1) * U(2)...
            - Beta(1)*Gminus(1)*Lambda(2) * ...
            theta_fluid_innen(timestep)...
            -Beta(3)*Gminus(1)*Lambda_plus(2) * ...
            theta_fluid_innen(timestep+1);
    end
    switch randb_aussen
    case 1 % Konvektion
        F(n) = - Beta(1)*Gminus(n) * U(n-1)...
            - (Beta(2)+Beta(1)*Gplus(n)*Lambda(3)) * U(n)...
            - Beta(1)*Gplus(n)*Lambda(4) * ...
            theta_fluid_aussen(timestep)...
            - Beta(3)*Gplus(n)*Lambda_plus(4) * ...
            theta_fluid_aussen(timestep+1);
    case 2 % Strahlung
        F(n) = - Beta(1)*Gminus(n) * U(n-1)...
            - (Beta(2)+Beta(1)*Gplus(n)) * U(n)...
            -Gplus(n)*Lambda(5)*(Beta(1)*q_dot_aussen(timestep) +...
            Beta(3)*q_dot_aussen(timestep+1));
    end

    for i = 2:n-1
        F(i) = - Beta(1)*Gminus(i) * U(i-1) - Beta(2) * U(i) - ...
            Beta(1)*Gplus(i) * U(i+1);
    end

    %%
    % Lösung des Gleichungssystems
    U=K\F;

    %%
    % Schreiben der Wandtemperaturen über Radius und Zeit
    writecount = writecount + 1;

    if writecount == d_time_write_walltemps / d_time
        switch randb_innen
        case 0
            wall_temps(writestep,:) = [U(1);U;0];
        case 1
            wall_temps(writestep,:) = [Lambda_plus(1)*U(1) + Lambda_plus(2)*theta_fluid_innen(timestep+1); U; 0];
            theta_fluid_plot(writestep,1) = theta_fluid_innen(timestep);
            alpha_plot(writestep,1) = alpha_innen(timestep);
        end
        switch randb_aussen
        case 1
            wall_temps(writestep,n+2) = Lambda_plus(3)*U(n) +...
                Lambda_plus(4)*theta_fluid_aussen(timestep+1);
            theta_fluid_plot(writestep,2) = theta_fluid_aussen(timestep);
            alpha_plot(writestep,2) = alpha_aussen(timestep);
        case 2
            wall_temps(writestep,n+2) = ...
                Lambda(5) * q_dot_aussen(timestep+1)+U(n);
            q_dot_aussen_plot(writestep) = q_dot_aussen(timestep);
        end
        if testcase == 0
            massenstrom_plot(writestep) = massenstrom(timestep);
        end
    end

```

```

        pressures_plot(writestep) = pressures(timestep);
    end

    writecount = 0;
    writestep = writestep + 1;
end
end

%%
%*****
% Prüfrechnung
%*****

if testcase == 98
    % theoretischer stationäre längenbezogene Wärmestrom
    flux_th = 2*pi*(theta_fluid_aussen(1)-theta_fluid_innen(1)) / ...
        (1/(alpha_innen(1)*radius_innen) + ...
        log(radius_aussen/radius_innen)/(polyval(lambda_wand_poly,...
        mean(wall_temps(end,:)))) + 1/(alpha_aussen(1)*radius_aussen));

    flux_num(1) = alpha_innen(1) * (wall_temps(end,1)-theta_fluid_innen(1)) * ...
        2*pi*radius_innen;
    flux_num(2) = alpha_aussen(1) * (theta_fluid_aussen(1)-...
        wall_temps(end,end)) * 2*pi*radius_aussen;

    err(1) = flux_num(1)-flux_th;
    err(2) = err(1) / flux_th;

    % Berechnung der theoretischen Energiemenge pro Meter, um von der
    % Anfangstemperatur(homogen) auf den stationären Zustand zu kommen
    theta_t1 = theta_fluid_innen(1) + flux_th / (alpha_innen(1)*2*pi*radius_innen);

    rhoc = polyval(lambda_wand_poly,mean(mean(wall_temps))) / ...
        polyval(a_wand_poly,mean(mean(wall_temps)));

    delta_q_th = 2 * pi * rhoc * ((theta_t1-t0)*(radius_aussen^2-radius_innen^2)/2 + ...
        flux_th/(polyval(lambda_wand_poly,mean(wall_temps(end,:)))*2*pi) * ...
        ((radius_aussen^2*log(radius_aussen)-radius_innen^2*log(radius_innen))/2 + ...
        (radius_innen^2-radius_aussen^2)/4 - (radius_aussen^2-radius_innen^2)/2 * ...
        log(radius_innen)));

    %kumulierte Energiemenge
    delta_q_num = 0;
    for i=1:length(wall_temps(:,1))
        delta_q_num = delta_q_num + d_time_write_walltemps * (alpha_innen(i) * ...
            (theta_fluid_innen(i)-wall_temps(i,1))*2*pi*radius_innen + ...
            alpha_aussen(i)*(theta_fluid_aussen(i)-wall_temps(i,end)) * ...
            2*pi*radius_aussen);
    end

    err(3) = delta_q_num - delta_q_th;
    err(4) = err(3) / delta_q_th;

    stratcat('Test 98 (Konv/Konv): Abw.stationärer Wärmestrom: ',num2str(err(2)*100),',...
        '% ; Abw. kumulierte Wärme: ',num2str(err(4)*100),'%')

elseif testcase == 99
    % numerische Speicherleistung
    rhoc = polyval(lambda_wand_poly,mean(mean(wall_temps))) / ...
        polyval(a_wand_poly,mean(mean(wall_temps)));
    q_dot_num = 0;
    for i=1:n
        q_dot_num = q_dot_num + rhoc * (radius_innen+(i-0.5)*d_radius)/...
            radius_aussen * d_radius * (wall_temps(end,n)-wall_temps(end-1,n))...
            / d_time_write_walltemps;
    end

    err(1) = q_dot_num - q_dot_aussen(1);
    err(2) = err(1) / q_dot_aussen(1);

    % kumulierte Energiemenge bis zum Simulationsende
    delta_q_num = 0;
    for i = 1:n_radius
        rhoc = polyval(lambda_wand_poly,mean(wall_temps(:,i))) / ...
            polyval(a_wand_poly,mean(wall_temps(:,i)));

```

```

    delta_q_num = delta_q_num + ((radius_innen+i*d_radius)^2 -...
        (radius_innen+(i-1)*d_radius)^2) * pi *...
        rhoc * (wall_temps(end,i)-t0);
end

% theoretische Energiemenge
delta_q_th = q_dot_aussen(1) * radius_aussen * 2 * pi *...
    length(wall_temps(:,1))*d_time_write_walltemps;

err(3) = delta_q_num - delta_q_th;
err(4) = err(3) / delta_q_th;

strcat('Test 99 (Iso/Strahlung): Abw.Wärmestromdichte: ',...
    num2str(err(2)*100), '% ; Abw.kumulierte Wärme: ', num2str(err(4)*100), '%')
end

%%
%*****
% Datenspeicherung
%*****
if testcase == 0
    if randb_aussen == 1 && randb_innen == 1
        simulation = struct('dataset',dataset,'dataset_namevars',dataset_namevars,...
            'alpha_innen',alpha_plot(:,1),'pressures',pressures_plot,...
            'massenstrom',massenstrom_plot,'wall_temps',wall_temps,...
            'theta_fluid',theta_fluid_plot,'radius_plot',radius_plot,...
            'time_plot',time_plot);
    elseif randb_aussen == 2 && randb_innen == 1
        simulation = struct('dataset',dataset,'dataset_namevars',dataset_namevars,...
            'alpha_innen',alpha_plot(:,1),'pressures',pressures_plot,...
            'massenstrom',massenstrom_plot,'q_dot_aussen',q_dot_aussen_plot,'wall_temps',wall_temps,...
            'theta_fluid',theta_fluid_plot,'radius_plot',radius_plot,...
            'time_plot',time_plot);
    elseif randb_aussen == 1 && randb_innen == 0
        simulation = struct('dataset',dataset,'dataset_namevars',dataset_namevars,...
            'alpha_aussen',alpha_plot(:,2),'pressures',pressures_plot,...
            'massenstrom',massenstrom_plot,'wall_temps',wall_temps,...
            'theta_fluid',theta_fluid_plot,'radius_plot',radius_plot,...
            'time_plot',time_plot);
    end
    save(strcat('simulation_',simstr, 'vartitle_file_', '_num2str(dataset(1))', '_ds_', num2str(dataset(2))), 'simulation');
end

%%
%*****
% Datenausgabe
%*****
if testcase == 0
    figure
    if and(randb_innen == 1, randb_aussen == 1)
        subplot(5,1,[1,3]);
        plot(time_plot, wall_temps(:,1), '-k',...
            time_plot, mean(wall_temps,2), '--k',...
            time_plot, theta_fluid_plot(:,1), '-k');
        legend('\vartheta_{W_{a_n_d_i_n_n_e_n}},...
            '\vartheta_{W_{a_n_d_m_i_t_t_e_l}},...
            '\vartheta_{F_l_u_i_d_i_n_n_e_n}');
        legend('Location','Best');
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
        %set(gca,'XTickLabel',{});
        %xlabel('Simulationszeit [min]', 'FontSize',10,'FontName','Times');
        ylabel('Temperatur [°C]', 'FontSize',10,'FontName','Times');
        grid on
        title(strcat('Datum:', blanks(1), datestr(datenum(num2str(dates(dateloop))), 'yyyymmdd')),',
            Datensatz:', num2str(ds(dsloop)), ', Simulation:', simtitle, vartitle_diag));

        subplot(5,1,4);
        plot(time_plot, mean(wall_temps,2)-wall_temps(:,1), '-k');
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
        %set(gca,'XTickLabel',{});
        %xlabel('Simulationszeit [min]', 'FontSize',10,'FontName','Times');
        ylabel('Temperaturdifferenz [K]', 'FontSize',10,'FontName','Times');
        grid on

        subplot(5,1,5);

```



```

        plot(time_plot,alpha_plot(:,1),'-k');
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
        xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
        ylabel('\alpha_{i_n_e_n} [W/m^2/K]','FontSize',10,'FontName','Times');
        grid on
    elseif randb_aussen == 2 && randb_innen == 1
        subplot(6,1,[1,3]);
        plot(time_plot,wall_temps(:,1),'-k',...
            time_plot,mean(wall_temps,2),'--k',...
            time_plot,theta_fluid_plot(:,1),'k');
        legend('\vartheta_{W_a_n_d_,i_n_n_e_n}',...
            '\vartheta_{W_a_n_d_,m_i_t_t_e_l}',...
            '\vartheta_{F_l_u_i_d_,i_n_n_e_n}');
        legend('Location','Best');
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
        %xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
        ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
        grid on
        title(strcat('Datum:',blanks(1),datestr(datetime(num2str(dates(dateloop))),'yyyymmdd')),'
Datensatz:',num2str(ds(dsloop))),' Simulation:',simstr, vartitle_diag));

        subplot(6,1,4);
        plot(time_plot,mean(wall_temps,2)-wall_temps(:,1),'-k');
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
        %xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
        ylabel('Temperaturdifferenz [K]','FontSize',10,'FontName','Times');
        grid on

        subplot(6,1,5);
        plot(time_plot,alpha_plot(:,1),'-k');
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
        %xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
        ylabel('\alpha_{i_n_e_n} [W/m^2/K]','FontSize',10,'FontName','Times');
        grid on

        subplot(6,1,6);
        plot(time_plot,q_dot_aussen_plot,'-k');
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
        xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
        ylabel('Bestrahlungsstärke [W/m^2]','FontSize',10,'FontName','Times');
        grid on
    end

saveas(gca,strcat(savepathstr,'simulation_',simstr,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(2)),'.fig'));

set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 26]);
print('-dmeta','-
r300',strcat(savepathstr,'simulation_',simstr,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(2))));
strcat(num2str(dates(dateloop)),'_',simstr,vartitle_file,'_',num2str(ds(dsloop)))
toc
else
    % Datenausgabe zu Testzwecken
    figure
    if randb_aussen == 1
        plot(time_plot,wall_temps(:,1),'-k',...
            time_plot,mean(wall_temps,2),'--k',...
            time_plot,wall_temps(:,end),'-k',...
            time_plot,theta_fluid_plot(:,1),'k');
        legend('\vartheta_{W_a_n_d_,i_n_n_e_n}',...
            '\vartheta_{W_a_n_d_,m_i_t_t_e_l}',...
            '\vartheta_{W_a_n_d_,a_u_s_s_e_n}',...
            '\vartheta_{F_l_u_i_d_,i_n_n_e_n}');
        legend('Location','Best');
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
        set(gca,'YMinorTick','on');
        set(gca,'XMinorTick','on');
        %set(gca,'XTickLabel',{});
        xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
        ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
        %grid on

    if testcase == 1
        ylim([40 110]);
        title('Sprungantwort: Konvektion');
        set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 9]);
        print('-dmeta','-r300','Simtest_Sprung_Konv');

```

```

elseif testcase == 2
    ylim([40 150]);
    title('Rampenantwort: Konvektion');
    set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 9]);
    print('-dmeta','-r300','Simtest_Rampe_Konv');
end
elseif randb_aussen == 2
    plot(time_plot,wall_temps(:,1),'-k',...
        time_plot,mean(wall_temps,2),'-k',...
        time_plot,wall_temps(:,end),'-k',...
        time_plot,theta_fluid_plot(:,1),'k');
    legend('\vartheta_{W_{a_n_d,i_n_n_e_n}},...
        '\vartheta_{W_{a_n_d,m_i_t_t_e_l}},...
        '\vartheta_{W_{a_n_d,a_u_s_s_e_n}},...
        '\vartheta_{F_{l_u_i_d,i_n_n_e_n}});
    legend('Location','Best');
    set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
    set(gca,'YMinorTick','on');
    set(gca,'XMinorTick','on');
    %set(gca,'XTickLabel',{});
    %ylim([40 150]);
    xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
    ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',10,'FontName','Times');
    %grid on
    title('Sprungantwort: Strahlung');
    set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 9]);
    print('-dmeta','-r300','Simtest_Sprung_Strahlung');
end

figure
surf(radius_plot,time_plot,wall_temps,'LineStyle','none','Marker',...
    'l','MarkerSize',0.5);
xlabel('Radius [mm]');
ylabel('Zeit [min]');
zlabel('Temperatur [°C]');
colorbar;
end
end
if testcase == 0
    close all
end
end
end
beep

%%
%*****
% Workspacebereinigung
%*****
clearvars F K K_haupt K_neben_oben K_neben_unten U
clearvars Beta beta_iso Gminus Gplus zeta
clearvars Lambda Lambda_plus lambda_wand_mittel lambda_wand_poly
clearvars a_wand_mittel a_wand_poly
clearvars c_iso rho_iso
clearvars mat randb_innen randb_aussen wandst wandst_iso
clearvars n_radius d_radius d_time d_time_write walltemps
clearvars radius_aussen radius_innen timespan timestep
%clearvars theta_fluid_aussen theta_fluid_innen
clearvars ans d_q_dot_num delta_q_num delta_q_th flux_num flux_th q_dot_num
clearvars rhoc t0 theta_t1
clearvars i n writecount writestep

```

G.4 Diagramme der Spannungskonzentrationsfaktoren

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Titel:                               Spannungsfaktoren
% Version                               0.6
% letzte Bearbeitung:                   2014-04-16
% Autor:                               Joscha Bongardt
% Kontakt:                             joscha.bongardt@gmx.de
%
% Software:                             Windows 8.1 64-bit, Matlab R2013a
%
% Benötigte Dateien: keine
%
% Benötigte Workspace Variablen: keine
%
%
% Beschreibung: Es werden die Spannungsfaktoren alpha_m und alpha_t über
% dem Durchmesser- und Wandstärkenverhältnis dargestellt
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

step = 100;
d_is = 0.1;
%e_d = 0.04:0.01:0.11;
e_d = [0.035 0.04 0.045 0.05 0.055 0.06 0.065 0.07 0.075 0.08 0.085 0.09];
e_rs = e_d*d_is;

l_rs_max = 10;
l_rb_max = 10;

Rp02_theta_zul = 228; %zul. Warmstreckgrenze in N/mm2
sigma_pc = 15.2;
ps = 1/(sigma_pc-0.5);
p_c = ps/(1+ps/2) * Rp02_theta_zul; % Berechnungsdruck in N/mm²

draw_alpha = 1; % 1=nur alpha_m; 2=nur alpha_t; 3= alpha_m+alpha_t

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

d_ib = d_is/step:d_is/step:d_is;
ee_grenz = zeros(length(e_rs),length(d_ib));
de_s = zeros(length(d_ib),length(e_rs));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Erstellung des xy-Diagramms für die Linien mit konstantem ers/dis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for n=1:length(e_rs)

    v_kehrw_grenz = (Rp02_theta_zul - p_c/2) * 2*e_rs(n) / (p_c * d_is);
    e_rb = e_rs(n)/step:e_rs(n)/step:e_rs(n);

    dd_i = d_ib/d_is;
    ee_r = e_rb/e_rs(n);

    l_rs = min(l_rs_max,((d_is+e_rs(n))*e_rs(n))^0.5);

    v_kehrw = zeros(length(d_ib),length(e_rb));
    alpha_m = zeros(length(d_ib),length(e_rb));
    alpha_t = zeros(length(d_ib),length(e_rb));

    for i=1:length(d_ib)
        for j=1:length(e_rb)

            l_rb = min(l_rb_max,((d_ib(i)+e_rb(j)) * e_rb(j))^0.5);

            Ap = d_is/2 * (l_rs+e_rb(j)+d_ib(i)/2) + d_ib(i)/2 * (l_rb+e_rs(n));
            Afs = e_rs(n)*(l_rs+e_rb(j));
            Afb = e_rb(j)*l_rb;
            v_kehrw(i,j) = 2*e_rs(n)*Ap / (d_is*(Afs+Afb));

```

```

zeta = (d_ib(i)+e_rb(n)) / (d_is+e_rs(n)) * ((d_is+e_rs(n)) / (2*e_rs(n)))^0.5;
alpha_m(i,j) = 2.2 + exp(-1.14*ee_r(j)^2-0.89*ee_r(j)+1.43)*zeta^(0.326*ee_r(j)^2-0.59*ee_r(j)+1.08);

hh = 1000;
dd_m = (d_ib(i)+e_rb(n)) / (d_is+e_rs(n));
alpha_t(i,j) = ((2-(hh+2700)/(hh+1700)*dd_m + hh/(hh+1700)*(exp(-7*dd_m)-1))^2 + 0.81*dd_m^2)^0.5;

% Überprüfung, ob der Abzweig dem Innendruck standhält
if (p_c/2*(d_ib(i)/e_rb(j)+1)) > Rp02_theta_zul
    alpha_m(i,j) = NaN;
    alpha_t(i,j) = NaN;
end
% Überprüfung, ob der Grundkörper der Belastung standhält
if (p_c*d_is/(2*e_rs(n))*v_kehrw(i,j)+p_c/2) > Rp02_theta_zul
    alpha_m(i,j) = NaN;
    alpha_t(i,j) = NaN;
end
end

fhandle = @(e_rb_var) (e_rs(n)*(1_rs+e_rb_var) + e_rb_var * min(1_rb_max,((d_ib(i)+e_rb_var)*e_rb_var)^0.5))...
/ (d_is/2 * (1_rs + e_rb_var + d_ib(i)/2) + d_ib(i)/2 * (e_rs(n) + min(1_rb_max,((d_ib(i)+e_rb_var)*e_rb_var)^0.5)))...
- p_c / (Rp02_theta_zul - p_c/2);

fzerooptions = optimset('Display','off');
e_rb_grenz = real(fzero(fhandle,e_rs(n),fzerooptions));

if max(de_s(:,n)) > 1
    de_s(i,n) = NaN;
else
    de_s(i,n) = max(e_rb_grenz / e_rs(n), p_c*d_ib(i)/e_rs(n) / (2*(Rp02_theta_zul-p_c/2)));
end
end
end

%%
%*****
% Bestimmung der Kontouren für alpha
%*****

alpha_m_contour = zeros(length(e_rb),length(d_ib));
alpha_t_contour = zeros(length(e_rb),length(d_ib));

for i=1:length(d_ib)
    for j=1:length(e_rb)
        ee_r = 1/length(e_rb)*j; % Entspricht e_rb/e_rs

        % Lösung von: (Afs+AfB)/Ap = p/(Sigma_zul-p/s)
        fhandle = @(e_rs_var) (e_rs_var*(((d_is+e_rs_var)*e_rs_var)^0.5 + e_rs_var*ee_r)...
+ e_rs_var*ee_r * ((d_ib(i)+e_rs_var*ee_r)*e_rs_var*ee_r)^0.5)...
/ (d_is/2 * ((d_is+e_rs_var)*e_rs_var)^0.5 + e_rs_var*ee_r + d_ib(i)/2)...
+ d_ib(i)/2 * (e_rs_var + ((d_ib(i) + e_rs_var*ee_r)*e_rs_var*ee_r)^0.5))...
- p_c/(Rp02_theta_zul-p_c/2);

        fzerooptions = optimset('Display','off');
        e_rs_grenz = real(fzero(fhandle,0.01,fzerooptions));

        zeta = (d_ib(i)+e_rs_grenz*ee_r) / (d_is+e_rs_grenz) * ((d_is+e_rs_grenz) / (2*e_rs_grenz))^0.5;
        alpha_m_contour(j,i) = 2.2 + exp(-1.14*ee_r^2-0.89*ee_r+1.43)*zeta^(0.326*ee_r^2-0.59*ee_r+1.08);

        hh = 1000;
        dd_m = (d_ib(i)+e_rs_grenz*ee_r) / (d_is+e_rs_grenz);
        alpha_t_contour(j,i) = ((2-(hh+2700)/(hh+1700)*dd_m + hh/(hh+1700)*(exp(-7*dd_m)-1))^2 + 0.81*dd_m^2)^0.5;
    end
end

%%
%*****
% Diagrammerstellung
%*****
ee_r = 1/length(e_rb):1/length(e_rb):1;

figure
plot1 = plot(dd_i,de_s,'LineWidth',1);
xlabel('\itd\rm_i_b/\itd\rm_i_s','FontSize',10,'FontName','Times');

```

```

ylabel('\it\rm_b\it\rm_s','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0 1]);
ylim([0 1]);
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
hold on
switch draw_alpha
case 1
    alpha_str = '\it\alpha\rm_m';
    [C,h] = contour(ee_r,dd_i,alpha_m_contour,(2:0.25:9),'DisplayName',alpha_str);
    contours = (2:0.5:9);
    clabel(C,h,contours,'FontSize',8,'FontName','Times');
case 2
    alpha_str = '\it\alpha\rm_t';
    [C,h] = contour(ee_r,dd_i,alpha_t_contour,(0.9:0.05:2),'DisplayName',alpha_str);
    contours = (0.9:0.1:2);
    clabel(C,h,contours,'FontSize',8,'FontName','Times');
case 3
    alpha_str = '\it\alpha\rm_m + \it\alpha\rm_t';
    [C,h] = contour(ee_r,dd_i,alpha_m_contour+alpha_t_contour,(4:0.1:9),'DisplayName',alpha_str);
    contours = (4:0.5:9);
    clabel(C,h,contours,'FontSize',8,'FontName','Times');
end
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
hold off

%%
%*****
% Diagrammbeschriftungen
%*****

% Erstellt die Randbeschriftung
for n=1:length(e_rs)
    set(plot1(n),'DisplayName',strcat('\it\rm_s\itd\rm_i_s=',num2str(e_d(n)*100,'%')));
    set(plot1(n),'Color',[0 0 0]);

    text(-sum(isnan(de_s(:,n))-1)/length(de_s(:,n)),min(de_s(end,n),1),...
        strcat('\it\rm_s\itd\rm_i_s=',num2str(e_d(n)*100,'%')),...
        'Rotation',atand((de_s(-sum(isnan(de_s(:,n))-1)-1,n) - de_s(-sum(isnan(de_s(:,n))-1)-2,n)) / (1/(length(dd_i)-1))),...
        'HorizontalAlignment','left','FontSize',8,'FontName','Times');
end

%Erstellt die Beschriftung für die ISO-alpha-Linien
switch draw_alpha
case 1
    textpos(1) = floor(0.8*step)/step;
    textpos(2) = interp1(alpha_m_contour(:,floor(textpos(1)*step)),ee_r,contours(end));
    text(textpos(1),textpos(2),alpha_str,...
        'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','middle','BackgroundColor','white',...
        'FontWeight','bold','FontSize',8,'FontName','Times');
case 2
    textpos(2) = floor(0.14*step)/step;
    textpos(1) = interp1(alpha_t_contour(floor(textpos(2)*step),:),dd_i,1);
    text(textpos(1),textpos(2),alpha_str,...
        'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','middle','BackgroundColor','white',...
        'FontWeight','bold','FontSize',8,'FontName','Times');
case 3
    textpos(1) = floor(0.8*step)/step;
    textpos(2) = interp1(alpha_m_contour(:,floor(textpos(1)*step))+...
        alpha_t_contour(:,floor(textpos(1)*step)),ee_r,contours(end));
    text(textpos(1),textpos(2),alpha_str,...
        'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','middle','BackgroundColor','white',...
        'FontWeight','bold','FontSize',8,'FontName','Times');
end

% legend('show','Location','SouthEast');
colormap(gray(1));
daspect([1 1 1]);
% labelstr = {strcat('p/(\sigma_z_u_l-0.5p)=',num2str(ps)),...
%   strcat('d_i_s=',num2str(d_is))};
labelstr = strcat('\it\sigma\rm_z_u_l\itp\rm=',num2str(sigma_pc));
text(0.99,0.01,labelstr,'HorizontalAlignment','right','VerticalAlignment','bottom','BackgroundColor','white','EdgeColor','black','FontSize',8,'FontName','Times');

%*****

```

```
% Speichern
%*****
set(gca,'Position',[0.08 0.08 0.82 0.81]);
saveas(gca,strcat('spf_',num2str(draw_alpha),'_spc_',num2str(sigma_pc),'.fig'));

set(gca,'Position',[0.17 0.1 0.66 0.66]);
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 15 15]);
print('-dmeta','-r800',strcat('spf_',num2str(draw_alpha)));
```

G.5 Schädigungsberechnungen

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Titel: creep_fatigue
% Version 0.8
% letzte Bearbeitung: 2014-04-01
% Autor: Joscha Bongardt
% Kontakt: joscha.bongardt@gmx.de
%
% Software: Windows 8.1 64-bit, Matlab R2013a student version
%
% Benötigte Dateien:
% - Simulationsergebnisse aus 'simulation_X_yyyymmdd_ds_x.mat' (output aus walltemp.mat)
% - Materialdaten aus 'material.mat' (output aus Materialkennwerte.mat)
%
% Benötigte Workspace Variablen:
% keine
%
% Ausgabevariablen:
% wenn keine Test: schaden_X_yyyymmdd_ds_x_schnitt_y.mat
%
% Beschreibung: Es werden die Lastwechsel gezählt und ihre maßgeblichen
% Werte berechnet. Daraufhin wird die inkrementelle Schädigung jedes
% Lastwechsels bestimmt.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Deklarationen
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
test = 0;
variation = 6;
calc_creep = 0; % Berechnung der Kriechschädigung (1=ja;0=nein)

switch variation
case 0
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_schaden_base\';
    vartitle = '';
    vartitle_diag = '';
    varnum1 = 1;
case 1 % Variation SKF alpha_m
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_schaden_var_alpham\';
    vartitle = '_var_alpham';
    varnum1 = [1 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2];
case 2 % Variation SKF alpha_t
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_schaden_var_alphat\';
    vartitle = '_var_alphat';
    varnum1 = [1 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2];
case 3 % Variation Wärmeübergangskoeffizient
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_schaden_var_alphai\';
    vartitle = '_var_alphai';
    varnum1 = [0.5 1.5 2 3 4];
case 4 % Variation konstanter Wärmeübergangskoeffizient
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_schaden_var_alphai\';
    vartitle = '_var_alphaiconst';
    varnum1 = [100 1000 10000]; % legt den konstanten Wärmeübergangskoeffizienten fest
case 5 % Variation der Wandstärke
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_schaden_var_wandst\';
    vartitle = '_var_wandst';
    varnum1 = [1.1 1.2 1.3 2.0];
case 6 % Variation des Zeitversatzes
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_schaden_var_timeshift\';
    vartitle = '_var_tshift';
    varnum1 = 120; %[-60 -30 -15 15 30 60];
case 7 % Variation des Innendurchmessers
    savepathstr = 'D:\Eigene Dokumente\MATLAB\figures_schaden_var_di\';
    vartitle = '_var_di';
    varnum1 = [1.1 1.2 1.3 1.4 1.5];
end

if test == 1
    schnitt = 6;

```

```

    dates = 20120604; % Datum der Zeitreihe

elseif test == 0
    %schnitt = [1,2,3,4,5,6];
    schnitt = [1,2,3,4,5,6,7];
    dates = [20120501;20120511;20120521;20120601;20120604];
end

%%%

for varloop=1:length(varnum1)

    switch variation
    case 0
        vartitle_file = '';
        vartitle_diag = '';
    case 1
        vartitle_diag = strcat(' Variation:',num2str(varnum1(varloop)*100),'% \alpha_m');
        vartitle_file = strcat(vartitle,num2str(varnum1(varloop)*100));
    case 2
        vartitle_diag = strcat(' Variation:',num2str(varnum1(varloop)*100),'% \alpha_t');
        vartitle_file = strcat(vartitle,num2str(varnum1(varloop)*100));
    case 3
        vartitle_diag = strcat(' Variation:',num2str(varnum1(varloop)*100),'% \alpha_{i_n_e_n}');
        vartitle_file = strcat(vartitle,num2str(varnum1(varloop)*100));
    case 4
        vartitle_diag = strcat(' Variation: \alpha_{i_n_e_n}=const.',num2str(varnum1(varloop)),'W/m^2/K');
        vartitle_file = strcat(vartitle,num2str(varnum1(varloop)));
    case 5
        vartitle_diag = strcat(' Variation:',num2str(varnum1(varloop)*100),'% Wandstärke');
        vartitle_file = strcat(vartitle,num2str(varnum1(varloop)*100));
    case 6
        vartitle_diag = strcat(' Variation:Zeitversatz=',num2str(varnum1(varloop)),'s');
        vartitle_file = strcat(vartitle,num2str(varnum1(varloop)));
    case 7
        vartitle_diag = strcat(' Variation:',num2str(varnum1(varloop)*100),'% Innendurchmesser');
        vartitle_file = strcat(vartitle,num2str(varnum1(varloop)*100));

    end

    for dateloop=1:length(dates)
        for schnittloop=1:length(schnitt)
            %%%
            %*****
            % Deklaration der Geometriefaktoren nach DIN 12952
            %*****
            switch schnitt(schnittloop)
            case 1 % Trommel - großer Stutzen
                verschw = 0.825; % Verschwächungsbeiwert (DIN 12952-3 S. 37ff)
                alpha_m = 3.08; % Spannungskonzentrationsfaktor bei Innendruck (DIN 12952-3 S.111)
                alpha_t = 1.38; % Spannungskonzentrationsfaktor bei Wärmesp. (DIN 12952-3 S.116)
                sim = 'A';
                ds = 1; % Datensatz
                % cleared

            case 2 % Trommel - kleiner Stutzen
                verschw = 0.931;
                alpha_m = 2.73;
                alpha_t = 1.85;
                sim = 'A';
                ds = 1;
                % cleared

            case 3 % ÜHSammler - 1. Strang
                verschw = 0.574;
                alpha_m = 3.25;
                alpha_t = 1.0;
                sim = 'B';
                if variation == 0
                    ds = [2,3,4,5]; % 2=Temp.differenz, 3=Temp.verhältnis, 4=Enthalpieverhältnis
                else
                    ds = 3;
                end
                % cleared
            end
        end
    end
end

```



```

case 4 % ÜHSammler - letzter Strang
    verschw = 0.796;
    alpha_m = 3.52;
    alpha_t = 1.57;
    sim = 'C';
    if variation == 0
        ds = [5,6]; % 5=Temp.verhältnis aus mittlerer Looptemp, 6=Temp.verhältnis aus FD-Temp.
    else
        ds = 5;
    end
    % cleared

case 5 % FD-Leitung - großer Abzweig
    verschw = 0.586;
    alpha_m = 3.49;
    alpha_t = 1;
    sim = 'D';
    if variation == 0
        ds = [5,6];
    else
        ds = 5;
    end
    % cleared

case 6 % FD-Leitung - kleiner Abzweig
    verschw = 0.721;
    alpha_m = 4.06;
    alpha_t = 1.43;
    sim = 'D';
    if variation == 0
        ds = [5,6];
    else
        ds = 5;
    end
    % cleared

case 7 % Receiver
    verschw = 1.0;
    alpha_m = 1.0;
    alpha_t = 1.0;
    sim = 'E';
    if variation == 0
        ds = [2,3,4]; % 2=Temp.differenz, 3=Temp.verhältnis, 4=Enthalpieverhältnis
    else
        ds = 3;
    end
    % cleared
end

switch variation
case 0
case 1
    alpha_m = alpha_m * varnum1(varloop);
case 2
    alpha_t = alpha_t * varnum1(varloop);
end

for dsloop=1:length(ds)

    load(strcat('simulation_',sim,vartitle_file,'_',num2str(dates(datelooop)),'_ds_',num2str(ds(dsloop)),'.mat'));

    % Deklaration der Konstanten für die Geometrie
    d_time = simulation.dataset(11); % Intervalldauer für Schadensakkumulation in Sekunden
    radius_innen = simulation.dataset(4); % Innerer Radius in Metern (0=Vollzylinder)
    wandst = simulation.dataset(3); % Wandstärke in Metern
    radius_aussen = radius_innen + wandst;
    mat = simulation.dataset(5); % Material für physikal. Eigenschaften

    mat_ZSF = mat; % Material für Zeitstandfestigkeit (1=P235GH, 2=P355GH, 3=13CrMo4-5)
    ort = 1; % Ort der Randspannungsberechnung 1=innen
    reduziere_extrema = 0;
    methode_RSE = 3; % Bewertung der Restextremwertfolge
    % 0: RSE bleibt unberücksichtigt

```

```

% 1: Rain-flow nach DIN 12952-4 B.6 b
% 2: modifiziertes Range-Pair (DIN 12952-4 B.6 d)
% 3: pure Rain-flow

d_x = 100; % N/mm^2 elastischen Schwingbreite

dataset = [dates(dateloop);schnitt(schnittloop);ds(dsloop);wandst;radius_innen;mat;mat_ZSF;...
methode_RSE;verschw;alpha_m;alpha_t];
dataset_namevars = ['date ','schnitt ','dataset ','wandstaerke';...
'radius_inne';'material ','materialZSF';'methode RSE';'verschwaech';...
'alpha_m ','alpha_t '];

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Materialdaten
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load('material.mat')
switch mat % nach DIN 12952
case 1 % 15NiCuMoNb5-6-4 (Gruppe 4.2)
    beta_diff_poly = mat_betadiff_poly_15NiCuMoNb;
    E_modul_poly = mat_Emod_poly_15NiCuMoNb;
    ferrit = 1; % Ferritisches Material = 1, Austenit = 0
case 2 % X10CrMoVNb9-1 (Gruppe 6.4)
    beta_diff_poly = mat_betadiff_poly_X10CrMoVNb;
    E_modul_poly = mat_Emod_poly_X10CrMoVNb;
    ferrit = 1;

case 3 % Ferrit Gruppe 1, 2.1, 4, 5.1, 5.2
    beta_diff_poly = [-1.287E-5 1.623E-2 10.98] * 1/1E6 ;
    E_modul_poly = [-1.824E-5 -6.91E-2 213.16] * 1E3;
    ferrit = 1;
case 4 % Ferrit Gruppe 6
    beta_diff_poly = [-7.5E-6 1.062E-2 10.11] * 1/1E6 ;
    E_modul_poly = [-6.185E-5 -4.28E-2 215.44] * 1E3;
    ferrit = 1;
case 5 % Austenit Gruppe 8.2, 215S15
    beta_diff_poly = [-9.99E-6 1.599E-2 14.97] * 1/1E6 ;
    E_modul_poly = [-8.48E-2 201.66] * 1E3;
    ferrit = 0;
end

switch mat_ZSF % Deklaration der Zeitstandfestigkeitswerte nach DIN 10028-2 und DIN 10216-2
case 1 % 15NiCuMoNb5-6-4 (Gruppe 4.2) DIN 10028-2
    if wandst <= 100
        R_m = 600; %N/mm²
        Rp02t = [418 401 388 377 366 355 342 328 309];
        temp_scale_Rp = [50 100 150 200 250 300 350 400 450];
    else
        R_m = 590; %N/mm²
        Rp02t = [408 392 379 368 357 347 335 320 302];
        temp_scale_Rp = [50 100 150 200 250 300 350 400 450];
    end
    zeitstandf = 0.8 * ...
        [402 373;...
        385 349;...
        368 325;...
        348 300;...
        328 273;...
        304 245;...
        274 210;...
        242 175;...
        212 139;...
        179 104;...
        147 69];
    temp_scale_zsf=[400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500];
    time_scale=[1E4 1E5];
case 2 % X10CrMoVNb9-1 (Gruppe 6.4) DIN 10216-2
    R_m = 630; %N/mm²
    Rp02t = [410 395 380 370 360 350 340 320 300 270 215];
    temp_scale_Rp = [100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600];
    zeitstandf = 0.8 * ...
        [289 258 246;...
        270 239 227;...
        254 220 208;...
        234 201 189;...

```

```

216 183 171;...
199 166 154;...
182 150 139;...
166 134 124;...
151 120 110;...
136 106 97;...
123 94 86;...
110 83 75;...
99 73 65;...
89 65 57;...
79 56 49;...
70 49 42;...
62 42 35];
temp_scale_zsf=[500 510 520 530 540 550 560 570 580 590 600 610 620 630 640 650 660];
time_scale=[1E4 1E5 2E5];

case 3 % P235GH
R_m = 300; %N/mm²
Rp02t = [193 182 169 155 142 130 121 114];
temp_scale_Rp = [50 100 150 200 250 300 350 400];
zeitstandf = 0.8 * ...
[229 165 145;...
211 148 129;...
191 132 115;...
174 118 101;...
158 103 89;...
142 91 78;...
127 79 67;...
113 69 57;...
100 59 48;...
86 50 40;...
75 42 33];
temp_scale_zsf=[380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480];
time_scale=[1E4 1E5 2E5];

case 4 % P355GH
R_m = 480; %N/mm²
Rp02t = [285 268 249 228 209 192 178 167];
temp_scale_Rp = [50 100 150 200 250 300 350 400];
zeitstandf = 0.8 * ...
[291 227 206;...
266 203 181;...
243 179 157;...
221 157 135;...
200 136 115;...
180 117 97;...
161 100 82;...
143 85 70;...
126 73 60;...
110 63 52;...
96 55 44;...
84 47 37;...
74 41 30];
temp_scale_zsf=[380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500];
time_scale=[1E4 1E5 2E5];

case 5 % 13CrMo4-5, 1.7335
R_m = 450; %N/mm²
Rp02t = [265 256 242 227 210 195 180 168 157 148];
temp_scale_Rp = [50 100 150 200 250 300 350 400 450 500];
zeitstandf = 0.8 * ...
[370 285 260;...
348 251 226;...
328 220 195;...
304 190 167;...
273 163 139;...
239 137 115;...
209 116 96;...
179 94 76;...
154 78 62;...
129 61 50;...
109 49 39;...
91 40 32;...
76 33 26];
temp_scale_zsf=[450 460 470 480 490 500 510 520 530 540 550 560 570];
time_scale=[1E4 1E5 2E5];

```

```

end

if calc_creep == 1
    m = zeros(length(temp_scale_zsf),2); % Steigung der logarithmischen Zeitstandfestigkeitsgeraden
    b = zeros(length(temp_scale_zsf),2); % 0-Schnittpunkt der logarithmischen Zeitstandfestigkeitsgeraden

    % Berechnung der Koeffizienten für die logarithmische Interpolation der Zeitstandfestigkeit
    for i=1:length(temp_scale_zsf)
        m(i,1) = (log10(zeitstandf(i,2))-log10(zeitstandf(i,1))) / (log10(time_scale(2)) - log10(time_scale(1)));
        b(i,1) = log10(zeitstandf(i,1)) - m(i,1) * log10(time_scale(1));

        if length(time_scale) == 3
            m(i,2) = (log10(zeitstandf(i,3))-log10(zeitstandf(i,2))) / (log10(time_scale(3)) - log10(time_scale(2)));
            b(i,2) = log10(zeitstandf(i,2)) - m(i,2) * log10(time_scale(2));
        elseif length(time_scale) == 2
            m(i,2) = m(i,1);
            b(i,2) = b(i,1);
        end
    end
end

end

%%
%*****
% Initialisierung der Ausganbevariablen
%*****

sigma = zeros(length(simulation.wall_temps),3);
% Spalte 1: Membranspannung
% Spalte 2: Randspannung am Lochübergang
% Spalte 3: Temperaturspannungen am Lochübergang
sigma_namevars = ['Membranspansp';'Randspannung ';'Tempspannung '];

creep = zeros(length(simulation.wall_temps),6);
% Spalte 1: inkrementelle Schädigung zu Spannung 1
% Spalte 2: inkr. Schädigung zu Spannung 2
% Spalte 3: akkumulierte Schädigung zu Spannung 1
% Spalte 4: akk. Schädigung zu Spannung 2
% Spalte 5: Lebensdauer bei Spannung 1 in Stunden
% Spalte 6: Lebensdauer bei Spannung 2 in Stunden
creep_namevars = ['Schaden1 inkr';'Schaden2 inkr';'Schaden1 kum ';'Schaden2 kum ';'...
'Lebensd1 in h';'Lebensd2 in h'];

extrema = zeros(length(simulation.wall_temps),2);

%%
%*****
% Spannungsberechnung
%*****

for i=1:length(simulation.wall_temps)

    %Membranspannung
    sigma(i,1) = 0.5 * (simulation.pressures(i)/10*2*radius_innen/verschw/wandst + simulation.pressures(i)/10);

    % Randspannung an Lochübergang
    sigma(i,2) = alpha_m * (2*radius_innen+wandst)/(2*wandst)*simulation.pressures(i)/10 ...
    + alpha_t *
    (polyval(beta_diff_poly,simulation.wall_temps(i,ort))*polyval(E_modul_poly,simulation.wall_temps(i,ort))/(0.7))...
    * ( mean(simulation.wall_temps(i,:))-simulation.wall_temps(i,ort)) + simulation.pressures(i)/10;

    %Nur Temperaturspannungen (zu Testzwecken)
    sigma(i,3) = alpha_t *
    (polyval(beta_diff_poly,simulation.wall_temps(i,ort))*polyval(E_modul_poly,simulation.wall_temps(i,ort))/(0.7))...
    * ( mean(simulation.wall_temps(i,:))-simulation.wall_temps(i,ort));

end
sigma = vertcat(sigma,sigma(1,:));

%%
%*****
% Berechnung der Kriechschädigung
%*****
if calc_creep == 1
    for i=1:length(simulation.wall_temps)

```

```

for j=1:2 %zwei Spalten für zwei Bemessungsspannungen gemäß Sigma(:,1) und Sigma(:,2)

    if simulation.wall_temps(i,ort) < 0.7*temp_scale_zsf(1) % Für Temperaturen deutlich unterhalb...
        % der kleinsten Zeitstandfestigkeitstemperatur wird eine
        % inkrementelle Kriechschädigung von 0.0 angenommen
        creep(i,j)=0;
        creep(i,j+4)=-1;

    elseif simulation.wall_temps(i,ort) < temp_scale_zsf(1) % Für Temperaturen leicht unterhalb der kleinsten
        % Zeitstandfestigkeitstemperatur werden die
        % Zeitstandfestigkeiten extrapoliert

        % Extrapolation der Zeitstandfestigkeiten zu kleineren Temperaturen
        zsf_t0(1) = interp1(temp_scale_zsf,zeitstandf(:,1),simulation.wall_temps(i,ort),'pchip','extrap');
        zsf_t0(2) = interp1(temp_scale_zsf,zeitstandf(:,2),simulation.wall_temps(i,ort),'pchip','extrap');

        if length(time_scale) == 3
            zsf_t0(3) = interp1(temp_scale_zsf,zeitstandf(:,3),simulation.wall_temps(i,ort),'pchip','extrap');

            if or(zsf_t0(1)<= zsf_t0(2),zsf_t0(2)<= zsf_t0(3))
                creep(i,j)=0;
                creep(i,j+4)=-1;
            else
                % Bestimmung der Funktionsparameter der logarithmischen
                % Zeitstandfestigkeit
                if sigma(i,j) >= zsf_t0(2)
                    m0 = (log10(zsf_t0(2))-log10(zsf_t0(1))) / (log10(time_scale(2)) - log10(time_scale(1)));
                    b0 = log10(zsf_t0(1)) - m0 * log10(time_scale(1));
                else
                    m0 = (log10(zsf_t0(3))-log10(zsf_t0(2))) / (log10(time_scale(3)) - log10(time_scale(2)));
                    b0 = log10(zsf_t0(2)) - m0 * log10(time_scale(2));
                end
                % Inkrementelle Schädigung
                creep(i,j) = d_time/3600 / (10^((log10(sigma(i,j))-b0)/m0));
                creep(i,j+4)=(10^((log10(sigma(i,j))-b0)/m0));
            end

        elseif length(time_scale) == 2

            if zsf_t0(1)<= zsf_t0(2)
                creep(i,j)=0;
                creep(i,j+4)=-1;
            else
                % Bestimmung der Funktionsparameter der logarithmischen
                % Zeitstandfestigkeit
                m0 = (log10(zsf_t0(2))-log10(zsf_t0(1))) / (log10(time_scale(2)) - log10(time_scale(1)));
                b0 = log10(zsf_t0(1)) - m0 * log10(time_scale(1));

                % Inkrementelle Schädigung
                creep(i,j) = d_time/3600 / (10^((log10(sigma(i,j))-b0)/m0));
                creep(i,j+4)=(10^((log10(sigma(i,j))-b0)/m0));
            end
        end

    elseif simulation.wall_temps(i,ort) >= temp_scale_zsf(1) && simulation.wall_temps(i,ort) <=
temp_scale_zsf(end) % Temperatur liegt innerhalb der Tabellenwerte
        for n=1:length(temp_scale_zsf)-1
            if simulation.wall_temps(i,ort) >= temp_scale_zsf(n) && simulation.wall_temps(i,ort) <=
temp_scale_zsf(n+1)
                break
                %temp_position = n;
            end
        end
        % lineare Interpolation zwischen den beiden angrenzenden Temperaturen
        T(1) = 10^((log10(sigma(i,j))-b(n,1))/m(n,1));
        T(2) = 10^((log10(sigma(i,j))-b(n+1,1))/m(n+1,1));

        if T(1) > time_scale(2)
            T(1) = 10^((log10(sigma(i,j))-b(n,2))/m(n,2));
        end
        if T(2) > time_scale(2)
            T(2) = 10^((log10(sigma(i,j))-b(n+1,2))/m(n+1,2));
        end

        % Bestimmung der Standzeit

```

```

        T_al = T(1) + (T(2)-T(1)) / (temp_scale_zsf(n+1)-temp_scale_zsf(n)) * (simulation.wall_temps(i,ort)-
temp_scale_zsf(n));
        % Inkrementelle Schädigung
        creep(i,j) = d_time/3600 / T_al;
        creep(i,j+4)= T_al;

    else
        creep(i,j)=1; % Temperaturen oberhalb der Zeitstandfestigkeitswerte gemäß DIN 12028-2
        creep(i,j+4)=-2;
    end

end

if i==1 % lineare Schadensakkumulation
    creep(i,3)=creep(i,1);
    creep(i,4)=creep(i,2);
else
    creep(i,3)=creep(i-1,3)+creep(i,1);
    creep(i,4)=creep(i-1,4)+creep(i,2);
end
end
end

%%
%*****
% Berechnung der LCF
%*****

% Herausfiltern der relativen Extrema (DIN 12952-4 B.4.1)
extrema(1,1)=sigma(1,2);
extrema(1,2)=1;
j=1;
for i=2:length(sigma)-1
    if or(extrema(j,1)<sigma(i,2) && sigma(i+1,2)<sigma(i,2),...
        extrema(j,1)>sigma(i,2) && sigma(i+1,2)>sigma(i,2))
        extrema(j+1,1) = sigma(i,2);
        extrema(j+1,2) = i;
        if i==length(sigma)-1
            extrema(j+2,1) = sigma(i+1,2);
            extrema(j+2,2) = i+1;
            j=j+1;
        end
        j = j+1;
    else
        if i==length(sigma)-1
            extrema(j+1,1) = sigma(i+1,2);
            extrema(j+1,2) = i+1;
            j = j+1;
        end
    end
end
extrema = extrema(1:j,:);

switch reduziere_extrema
case 1 % Löschen der Extremwerte, die zu kleinen Lastwechseln gehören (DIN 12952-4 B.4.3)
    extrema_red = zeros(length(extrema),2);
    extrema_red(1,:) = extrema(1,:);
    extrema_red(2,:) = extrema(2,:);
    i=3;
    j=1;
    while i<=length(extrema)
        if and(or(extrema(i,1)<extrema_red(j+1,1),extrema(i,1)>extrema_red(j,1)),...
            and(extrema(i,1)>extrema_red(j+1,1),extrema(i,1)<=extrema_red(j,1))),...
            abs(extrema_red(j+1,1)-extrema_red(j,1))<=d_x)
            if i<length(extrema)
                extrema_red(j+1,:) = extrema(i+1,:);
            end
            i=i+2;
            la=0;
        else
            extrema_red(j+2,:) = extrema(i,:);
            i=i+1;
            j=j+1;
            la=1;
        end
    end
end
end

```

```

        extrema_red = extrema_red(1:j+1a,:);
    case 0
        extrema_red = extrema;
    end

% Identifizierung von geschlossenen Hystereseschleifen (DIN 12952-4 B.5)
LC = zeros(length(extrema_red),10); % Lastwechsel
% Spalte 1: 2xAmplitude (2f_va)
% Spalte 2: Mittelspannung (f_v)
% Spalte 3: Bezugstemperatur
% Spalte 4/5: ursprüngliche Datensatznummern
% Spalte 6: Lastwechselzählung (1 oder 0.5)
% Spalte 7: temperaturkorrigierte Spannungsschwingbreite auf Probekörper bezogen (2f_at)
% Spalte 8: zul. Lastspielanzahl (ohne Teilsicherheitsbeiwert)
% Spalte 9: inkrementelle Niedriglastwechselermüdung (mit Teilsicherheitsbeiwert)
% Spalte 10: kumulierte LCF
LC_nemavars = ['2xAmpl 2f_va'; 'Mittelsp f_v'; 'Bezugstemper'; 'Zeilennum 1 '; ...
    'Zeilennum 2 '; 'LC Zählung '; 'tkorSp 2f_at'; 'LC zul '; ...
    'Schaden ink'; 'Schaden kum '];

%extrema_temp = extrema_red;
extrema_remain = extrema_red;

%*****

j=0;
LC_found=1;
while LC_found == 1
    i=1;
    LC_found=0;
    while and(LC_found==0, i <= length(extrema_remain(:,1))-3);
        if or(extrema_remain(i+3,1) > extrema_remain(i+2,1)...
            && extrema_remain(i,1) <= extrema_remain(i+2,1)...
            && extrema_remain(i+1,1) <= extrema_remain(i+3,1),...
            extrema_remain(i+3,1) < extrema_remain(i+2,1)...
            && extrema_remain(i,1) >= extrema_remain(i+2,1)...
            && extrema_remain(i+1,1) >= extrema_remain(i+3,1))
            % Lastwechsel gefunden!
            j=j+1;
            LC(j,1) = abs(extrema_remain(i+2,1) - extrema_remain(i+1,1)); %doppelte Schwingungsamplitude 2f_va
            LC(j,2) = (extrema_remain(i+2,1) + extrema_remain(i+1,1)) / 2; %Mittelspannung f_v
            LC(j,3) =
0.75*(max(simulation.wall_temps(extrema_remain(i+1,2),ort),simulation.wall_temps(extrema_remain(i+2,2),ort)))...
+
0.25*(min(simulation.wall_temps(extrema_remain(i+1,2),ort),simulation.wall_temps(extrema_remain(i+2,2),ort)));
            %Bezugstemperatur
            LC(j,4) = extrema_remain(i+1,2);
            LC(j,5) = extrema_remain(i+2,2);
            LC(j,6) = 1; % die hier gezählten Lastwechsel bilden eine geschlossene Hystereseschleife und zählen als ein
ganzer Lastwechsel

            extrema_remain = vertcat(extrema_remain(1:i,:),extrema_remain(i+3:end,:));

            LC_found = 1;
        else
            i=i+1;
            LC_found = 0;
        end
    end
end
LC = LC(1:j,:);

% Bestimmung der Anrisslastwechselzahl (DIN 12952-4 B.6)
for i=1:length(LC(:,1))
    if ferrit == 1
        Ct = 1.03 - 1.5E-4 * min(LC(i,3),700) - 1.5E-6 * min(LC(i,3),700)^2; % Temperaturkorrekturfaktor (DIN
12952-3 B.6.2)
    elseif ferrit == 0
        Ct = 1.043 - 4.3E-4 * min(LC(i,3),700); % Temperaturkorrekturfaktor (DIN 12952-3 B.6.2)
    end
    Rp02t_interp = interp1(temp_scale_Rp,Rp02t,LC(i,3),'pchip');
    if abs(LC(i,2)) + LC(i,1)/2 <= Rp02t_interp %elastischer Bereich

```

```

    LC(i,7) = LC(i,1) / (1-(LC(i,2)/R_m)^2) / Ct;
elseif abs(LC(i,2)) + LC(i,1)/2 > Rp02t_interp && LC(i,1) <= 2 * Rp02t_interp %teilplastischer Bereich
    LC(i,7) = LC(i,1) / (1-((Rp02t_interp-LC(i,1)/2)/R_m)^2) / Ct;
elseif LC(i,1) > 2 * Rp02t_interp %vollplastischer Bereich
    LC(i,7) = LC(i,1)^2 / (2 * Rp02t_interp) / Ct;
end

if LC(i,7) > 0.8*R_m
    LC(i,8) = ((173150-0.8*R_m) / (LC(i,7)-0.8*R_m))^(1/0.547); %zulässige Lastspielzahl ohne
Teilsicherheitsbeiwert
    LC(i,9) = 1 / min(LC(i,8)/10,...
    ((173150-0.8*R_m) / (1.5*LC(i,7)-0.8*R_m))^(1/0.547));
    %inkrementelle Ermüdung mit Sicherheitsbeiwert von 10 (DIN 12952-3 B.7.1)

end

if i==1
    LC(i,10) = LC(i,9);
else
    LC(i,10) = LC(i-1,10) + LC(i,9);
end
end

%%
%*****
% Verarbeitung der Restextremwerte
%*****
RSE = zeros(length(extrema_remain(:,1))-1,10);
% Spalte 1: 2xAmplitude (2f_va)
% Spalte 2: Mittelspannung (f_v)
% Spalte 3: Bezugstemp.
% Spalte 4/5: ursprüngliche Datensatznummern
% Spalte 6: Lastwechselzählung (ja nach Methode)
% Spalte 7: temperaturkorrigierte Spannungsschwingbreite auf Probekörper bezogen (2f_at)
% Spalte 8: zul. Lastspielanzahl (ohne Teilsicherheitsbeiwert)
% Spalte 9: inkrementelle Niedriglastwechselermüdung (mit Teilsicherheitsbeiwert)
% Spalte 10: kumulierte LCF

walltemp_ort = vertcat(simulation.wall_temps(:,ort),simulation.wall_temps(1,ort)); %Ergänzt den ersten Datenpunkt

switch methode_RSE
case 0 % keine Berücksichtigung der RSE
case 1 % Rain-flow (DIN 12952-4 B.6 b)
    max_LC = 0;
    for i=1:length(extrema_remain)-1
        RSE(i,1) = abs(extrema_remain(i+1,1) - extrema_remain(i,1)); %doppelte Schwingungsamplitude 2f_va
        RSE(i,2) = (extrema_remain(i+1,1) + extrema_remain(i,1)) / 2; %Mittelspannung f_v
        RSE(i,3) = 0.75*(max(walltemp_ort(extrema_remain(i,2)),walltemp_ort(extrema_remain(i+1,2))))...
        + 0.25*(min(walltemp_ort(extrema_remain(i,2)),walltemp_ort(extrema_remain(i+1,2))));
        %Bezugstemperatur
        RSE(i,4) = extrema_remain(i,2);
        RSE(i,5) = extrema_remain(i+1,2);

        if abs(extrema_remain(i+1,1)-extrema_remain(i,1)) > max_LC
            max_LC = abs(extrema_remain(i+1,1)-extrema_remain(i,1));
            n_max = i;
        end
    end
    RSE(:,6) = 0.5;
    RSE(n_max,6) = 1;

case 2 % DIN 12952-4 B.6 d
    max_LC = 0;
    for i=1:length(extrema_remain)-1
        if abs(extrema_remain(i+1,1)-extrema_remain(i,1)) > max_LC
            max_LC = abs(extrema_remain(i+1,1)-extrema_remain(i,1));
            n_max = i;
        end
    end
    j=1;
    if n_max/2==floor(n_max/2); start_RSE = 2; else start_RSE = 1; end
    for i=start_RSE:2:length(extrema_remain(:,1))-1
        RSE(j,1) = abs(extrema_remain(i+1,1) - extrema_remain(i,1)); %doppelte Schwingungsamplitude 2f_va
        RSE(j,2) = (extrema_remain(i+1,1) + extrema_remain(i,1)) / 2; %Mittelspannung f_v
        RSE(j,3) = 0.75*(max(walltemp_ort(extrema_remain(i,2)),walltemp_ort(extrema_remain(i+1,2))))...

```



```

        + 0.25*(min(walltemp_ort(extrema_remain(i,2)),walltemp_ort(extrema_remain(i+1,2))));
%Bezugstemperatur
    RSE(j,4) = extrema_remain(i,2);
    RSE(j,5) = extrema_remain(i+1,2);
    RSE(j,6) = 1;
    j=j+1;
end
RSE = RSE(1:j-1,:);

case 3 % pure Rain-Flow
    for i=1:length(extrema_remain)-1
        RSE(i,1) = abs(extrema_remain(i+1,1) - extrema_remain(i,1)); %doppelte Schwingungsamplitude 2f_va
        RSE(i,2) = (extrema_remain(i+1,1) + extrema_remain(i,1)) / 2; %Mittelspannung f_v

        RSE(i,3) = 0.75*(max(walltemp_ort(extrema_remain(i,2)),walltemp_ort(extrema_remain(i+1,2)))...
            + 0.25*(min(walltemp_ort(extrema_remain(i,2)),walltemp_ort(extrema_remain(i+1,2))));
%Bezugstemperatur

        %          RSE(i,3) =
0.75*(max(simulation.wall_temps(extrema_remain(i,2),ort),simulation.wall_temps(extrema_remain(i+1,2),ort))...
        %          +
0.25*(min(simulation.wall_temps(extrema_remain(i,2),ort),simulation.wall_temps(extrema_remain(i+1,2),ort)));
%Bezugstemperatur

        RSE(i,4) = extrema_remain(i,2);

        if i == length(extrema_remain)-1
            RSE(i,5) = length(simulation.wall_temps(:,1));
        else
            RSE(i,5) = extrema_remain(i+1,2);
        end

        end
        RSE(:,6) = 0.5;
    end

    for i=1:length(RSE(:,1))
        if ferrit == 1
            Ct = 1.03 - 1.5E-4 * min(RSE(i,3),700) - 1.5E-6 * min(RSE(i,3),700)^2; % Temperaturkorrekturfaktor (DIN
12952-3 B.6.2)
        elseif ferrit == 0
            Ct = 1.043 - 4.3E-4 * min(RSE(i,3),700); % Temperaturkorrekturfaktor (DIN 12952-3 B.6.2)
        end
        Rp02t_interp = interp1(temp_scale_Rp,Rp02t,LC(i,3),'pchip');

        if abs(RSE(i,2)) + RSE(i,1)/2 <= Rp02t_interp %elastischer Bereich
            RSE(i,7) = RSE(i,1) / (1-(RSE(i,2)/R_m)^2) / Ct;
        elseif abs(RSE(i,2)) + RSE(i,1)/2 > Rp02t_interp && RSE(i,1) <= 2 * Rp02t_interp %teilplastischer Bereich
            RSE(i,7) = RSE(i,1) / (1-((Rp02t_interp-RSE(i,1)/2)/R_m)^2) / Ct;
        elseif RSE(i,1) > 2 * Rp02t_interp %vollplastischer Bereich
            RSE(i,7) = RSE(i,1)^2 / (2 * Rp02t_interp) / Ct;
        end

        if RSE(i,7) > 0.8*R_m
            RSE(i,8) = ((173150-0.8*R_m) / (RSE(i,7)-0.8*R_m))^(1/0.547); %zulässige Lastspielzahl ohne
Teilsicherheitsbeiwert
            RSE(i,9) = 1 / min(RSE(i,8)/10,...
                ((173150-0.8*R_m) / (1.5*RSE(i,7)-0.8*R_m))^(1/0.547)) * RSE(i,6); %inkrementelle Ermüdung mit
Sicherheitsbeiwert von 10 (DIN 12952-3 B.7.1)
            end

            if i==1
                RSE(i,10) = RSE(i,9);
            else
                RSE(i,10) = RSE(i-1,10) + RSE(i,9);
            end
        end

        %%
        % Gesamtlastwechselermüdung
        LC_komplett = sortrows(vercat(LC,RSE),5); % Sortiert die Variable nach aufsteigendem Zeitpunkt zu dem die
Hysteresis schließt
        j=0;
        for i=1:length(LC_komplett)
            if LC_komplett(i,7) <= d_x

```

```

else
    j=j+1;
    LC_komplett(j,:) = LC_komplett(i,:);
    if j==1
        LC_komplett(j,10) = LC_komplett(j,9);
    else
        LC_komplett(j,10) = LC_komplett(j-1,10) + LC_komplett(j,9);
    end
end
end
% LC_komplett(j,1:4) = 0;
% LC_komplett(j,5) = length(sigma(:,1));
% LC_komplett(j,6:9) = 0;
% LC_komplett(j,10) = LC_komplett(j-1,10);
LC_komplett = LC_komplett(1:j,:);

teilung_hist = 10;
LC_komplett_temp = sortrows(vertcat(LC,RSE),1);
LC_komplett_hist = zeros(floor(max(LC_komplett_temp(:,7))/teilung_hist)+1,3);
i=1;
j=1;
while i<=length(LC_komplett_temp(:,1))
    %LC_komplett_hist(j,1) = j*teilung_hist;
    if LC_komplett_temp(i,1) > (j-1)*teilung_hist && LC_komplett_temp(i,1) <= j*teilung_hist
        LC_komplett_hist(j,2) = LC_komplett_hist(j,2) + LC_komplett_temp(i,6);
        i=i+1;
    elseif LC_komplett_temp(i,1) > j*teilung_hist
        j=j+1;
    end
end
LC_komplett_temp = sortrows(vertcat(LC,RSE),7);
i=1;
j=1;
while i<=length(LC_komplett_temp(:,1))
    LC_komplett_hist(j,1) = j*teilung_hist;
    if LC_komplett_temp(i,7) > (j-1)*teilung_hist && LC_komplett_temp(i,7) <= j*teilung_hist
        LC_komplett_hist(j,3) = LC_komplett_hist(j,3) + LC_komplett_temp(i,6);
        i=i+1;
    elseif LC_komplett_temp(i,7) > j*teilung_hist
        j=j+1;
    end
end
end

%%
%*****
% Datenspeicherung
%*****

sigma = sigma(1:end-1,:); % Entfernen des anfangs ergänzten ersten Datenpunktes

if calc_creep == 1
    schaden = struct('dataset',dataset,'dataset_namevars',dataset_namevars,...
        'spannung',sigma,'spannung_namevars',sigma_namevars,'LC',LC,'LC_komplett',LC_komplett,...
        'LC_komplett_hist',LC_komplett_hist,'RSE',RSE,'extrema',extrema,...
        'creep',creep,'creep_namevars',creep_namevars,'LC_nemavars',LC_nemavars);
else
    schaden = struct('dataset',dataset,'dataset_namevars',dataset_namevars,...
        'spannung',sigma,'spannung_namevars',sigma_namevars,'LC',LC,'LC_komplett',LC_komplett,...
        'LC_komplett_hist',LC_komplett_hist,'RSE',RSE,'extrema',extrema,...
        'LC_nemavars',LC_nemavars);
end

save(strcat('schaden_',sim,variable_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(ds(dsloop)),'_schnitt_',num2str(schnitt(schnittloop)))',schaden');

if test == 0
    lc_count = 0;
    for i=1:length(LC_komplett(:,1))
        if LC_komplett(i,8) > 0
            lc_count = lc_count + LC_komplett(i,6);
        end
    end
    if isempty(LC_komplett)==1

```

```

        gesamtschaden = 0;
    else
        gesamtschaden = LC_komplett(end,10);
    end
    %result_new =
{date,ds,sim,schnitt,LC(end,10),RSE(end,10),LC_komplett(end,10),sum(logical(LC_komplett(:,9))))};
    result_new = {datestr(now);datestr(datetime(num2str(dates(dateloop)), 'yyyymmdd'))};...
    ds(dsloop);sim;schnitt(schnittloop);radius_innen;wandst;simulation.dataset(6);...
    simulation.dataset(7);simulation.dataset(13);...
    max(mean(simulation.wall_temps,2)-simulation.wall_temps(:,ort));...
    min(mean(simulation.wall_temps,2)-simulation.wall_temps(:,ort));...
    LC(end,10);RSE(end,10);gesamtschaden;lc_count};

    if exist(strcat('result',vartitle_file,'.mat'),'file')==0
        result = horzcat({'Berechnungsdatum';'Messreihendatum';'Datensatz';...
            'Simulation';'Schnitt';'Radius innen';'Wandstärke';'alpha_cond';...
            'alpha_scale';'Zeitversatz';...
            'maximale Temperaturdiff';'minimale Temperaturdiff';...
            'kum Schaden ohne RSE';'kum schaden nur RSE';'kum Gesamtschaden';...
            'Anzahl schädigender Lastwechsel'};result_new);
        save(strcat('result',vartitle_file,'.mat'),'result');
    elseif exist(strcat('result',vartitle_file,'.mat'),'file')==2
        result = importdata(strcat('result',vartitle_file,'.mat'));
        result = horzcat(result,result_new);
        save(strcat('result',vartitle_file,'.mat'),'result');
    end
end

%%
%*****
% Datenausgabe
%*****

% Erstellen des Schädigungs-LC-Time-Plots

if isempty(LC_komplett)==0
    LC_plot = NaN(length(sigma(:,1)),length(LC_komplett(:,1)));
    for i=1:length(LC_komplett(:,1))
        if not(LC_komplett(i,9) == 0)
            LC_plot(LC_komplett(i,4):LC_komplett(i,5),i) = LC_komplett(i,9);
        end
    end
else
    LC_plot = NaN(length(sigma(:,1)),1);
end

figure
subplot(2,1,1);
plot(simulation.time_plot,LC_plot,'-k','LineWidth',4);
%xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('inkrementelle Schädigung \Delta D_i','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0 900]);
ylim([min(1E-6,min(min(LC_plot))) max(1E-4,max(max(LC_plot)))]);
set(gca,'XTickLabel',{''});
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YScale','log');
set(gca,'Position',[0.13 0.53 0.775 0.4]);
grid on
title(strcat('Datum:',datestr(datetime(num2str(dates(dateloop)), 'yyyymmdd'))),' , Datensatz:',num2str(ds(dsloop)),' ,
Simulation:',sim,' , Schnitt: ',num2str(schnitt(schnittloop)),vartitle_diag));

%saveas(gca, strcat(savepathstr,'LC_time',sim,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(3)),'_schnitt_',num2str(
schnitt(schnittloop)),'.fig'));

% Spannungen
subplot(2,1,2);
plot(simulation.time_plot,sigma(:,2),'-k',...
    simulation.time_plot,sigma(:,3),'-k');
xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Spannung [N/mm²]','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0 900]);
legend('\sigma_v_{t_0}','\sigma_{t_{a_n,t_h,t_0}}');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'Position',[0.13 0.1 0.775 0.4]);
grid on

```

```

        %title(strcat('Datum:',datestr(datenum(num2str(dates(dateloop)),'yyyymmdd'))',' Datensatz:',num2str(ds(dsloop))','
Simulation:',sim',' Schnitt: ',num2str(schnitt(schnittloop)),vartitle_diag));

saveas(gca, strcat(savepathstr,'schaden_',sim,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(3)),'_schnitt_',num2str(schnitt(schnittloop)),'.fig'));
    set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 16]);
    print('-dmeta','-
r300',strcat(savepathstr,'schaden_',sim,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(3)),'_schnitt_',num2str(schnitt(schnittloop))));

% figure
% [hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(simulation.time_plot,LC_plot,...
% simulation.time_plot,sigma(:,2:3));
% grid on
% ylabel(hAx(1),'inkrementelle Schädigung','FontSize',10,'FontName','Times');
% ylabel(hAx(2),'Spannung [N/mm²]','FontSize',10,'FontName','Times');
% set(hLine1,'LineWidth',4);
% set(hLine2(1),'LineStyle','-');
% set(hLine2(2),'LineStyle',':');
% ylim(hAx(2),[-100 500]);

% RSE
figure
plot(extrema_remain(:,2)*d_time/60,extrema_remain(:,1),'-ok','LineWidth',1.5);
xlabel('Simulationszeit [min]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Spannung [N/mm²]','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0 900]);
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
grid on
title(strcat('Datum:',datestr(datenum(num2str(dates(dateloop)),'yyyymmdd'))',' Datensatz:',num2str(ds(dsloop))','
Simulation:',sim',' Schnitt: ',num2str(schnitt(schnittloop)),vartitle_diag));

saveas(gca, strcat(savepathstr,'RSE_',sim,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(3)),'_schnitt_',num2str(schnitt(schnittloop)),'.fig'));
    set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 10]);
    print('-dmeta','-
r300',strcat(savepathstr,'RSE_',sim,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(3)),'_schnitt_',num2str(schnitt(schnittloop))));

% Spannungsschwingbreiten Histogramm
figure
subplot(2,1,1)
bar(LC_komplett_hist(:,1)-5,LC_komplett_hist(:,2),'k','BarWidth',0.5);
xlabel('Spannungsschwingbreite \sigma_v_a [N/mm²]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl','FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([d_x max(max(LC_komplett_hist(:,1)),500)]);
ylim([0 min(max(LC_komplett_hist(:,2)),1)]);
set(gca,'XTick',d_x:50:max(max(LC_komplett_hist(:,1)),500));
title(strcat('Datum:',datestr(datenum(num2str(dates(dateloop)),'yyyymmdd'))',' Datensatz:',num2str(ds(dsloop))','
Simulation:',sim',' Schnitt: ',num2str(schnitt(schnittloop)),vartitle_diag));
grid on

subplot(2,1,2)
bar(LC_komplett_hist(:,1)-5,LC_komplett_hist(:,3),'k','BarWidth',0.5);
xlabel('maßg. temp-korrigierte Spannungsschwingbreite \sigma_a_\vartheta_*
[N/mm²]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl','FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([d_x max(max(LC_komplett_hist(:,1)),500)]);
ylim([0 min(max(LC_komplett_hist(:,3)),1)]);
set(gca,'XTick',d_x:50:max(max(LC_komplett_hist(:,1)),500));
%title(strcat('Datum:',datestr(datenum(num2str(dates(dateloop)),'yyyymmdd'))',' Datensatz:',num2str(ds(dsloop))','
Simulation:',sim',' Schnitt: ',num2str(schnitt(schnittloop)),vartitle_diag));
grid on

saveas(gca, strcat(savepathstr,'hist_',sim,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(3)),'_schnitt_',num2str(schnitt(schnittloop)),'.fig'));
    set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 10]);
    print('-dmeta','-
r300',strcat(savepathstr,'hist_',sim,vartitle_file,'_',num2str(dataset(1)),'_ds_',num2str(dataset(3)),'_schnitt_',num2str(schnitt(schnittloop))));

```

```

%saveas(gca, strcat('lastwechsel_', sim, vartitle_file, '_', num2str(dataset(1)), '_ds_', num2str(dataset(3)), '_schnitt_', num2str(schnitt(
schnittloop)), '.fig'));

%kumulierte Schädigung
% figure;
% plot(LC_komplett(:,5)*d_time/60, LC_komplett(:,10), [0 length(simulation.pressures)*d_time/60], [0
length(simulation.pressures)*d_time/60*0.2/(25*8760)]);
% legend('Niedriglastwechselermüdung', 'lineare Schadensgerade(0.2 nach 25 Jahren)');
% xlabel('Simulationszeit [min]');
% ylabel('kumulierte Schädigung [-]');
% title(strcat('Datum:', datestr(datenum(num2str(dates(dateloop))), 'yyyymmdd')), ',
Datensatz:', num2str(ds(dsloop)), ', Simulation:', sim, vartitle, ', Schnitt: ', num2str(schnitt(schnittloop)), vartitle_diag));
% grid on
%

saveas(gca, strcat(savepathstr, 'schaden_kum_', sim, vartitle_file, '_', num2str(dataset(1)), '_ds_', num2str(dataset(3)), '_schnitt_', num
2str(schnitt(schnittloop)), '.fig'));
%
% figure;
% plot(simulation.time_plot, creep(:,3), LC_komplett(:,5)*d_time/60, LC_komplett(:,10), [0
length(simulation.pressures)*d_time/60], [0 length(simulation.pressures)*d_time/60*0.4/(20*8760)]);
% legend('Kriechschädigung(Membranspannung)', 'Niedriglastwechselermüdung', 'lineare
Schadensgerade(0,4 nach 20 Jahren)');
% xlabel('Simulationszeit [min]');
% ylabel('kumulierte Schädigung [-]');
% title(strcat('Datum:', datestr(datenum(num2str(dates(dateloop))), 'yyyymmdd')), ',
Datensatz:', num2str(ds(dsloop)), ', Simulation:', sim, vartitle, ', Schnitt: ', num2str(schnitt(schnittloop)), vartitle_diag));
% grid on
%

saveas(gca, strcat(savepathstr, 'schaden_', sim, vartitle_file, '_', num2str(dataset(1)), '_ds_', num2str(dataset(3)), '_schnitt_', num2str(sc
hnitt(schnittloop)), '.fig'));

% figure;
% hist(vercat(LC(:,1), RSE(:,1)), 50:10:500);
% xlabel('doppelte Spannungsamplitude [N/mm²]');
% ylabel('abs. Lastwechselhäufigkeit');
% xlim([100 1.1*max(LC(:,1))]);
% grid on

end
end
close all
end
end
beep

%%
%*****
% Datenbereinigung
%*****

clearvars T T_al m m0 b b0 zsf_t0
clearvars i j k n LC_found la
clearvars d_time radius_innen wandst radius_aussen mat
%clearvars mat_ZSF ort
clearvars max_LC start_RSE
clearvars extrema_temp LC_temp LC_komplett_temp teilung_hist
clearvars Rp02t_interp Ct

```

G.6 Zusammenfassende Diagramme

```

%%
% #####
% Titel: resultplot
% Version 1.0
% letzte Bearbeitung: 2014-04-11
% Autor: Joscha Bongardt
% Kontakt: joscha.bongardt@gmx.de
%
% Erstellt auf: Windows 8.1 64-bit, Matlab R2013a
%
% Benötigte Dateien:
% - Schadensberechnungen aus schaden_X_yyyymmdd_ds_x_schnitt_y.mat (output aus creep_fatigue.mat)
%
% Benötigte Workspace Variablen:
% keine
%
% Ausgabevariablen: keine
%
%
% Beschreibung: Fasst die Ergebnisse der Schadensberechnungen zusammen und
% stellt sie in einem Diagramm mit der Schadenssumme, dem Anteil der Betriebsschädigung an der
% Warmstartschädigung und der kumulierte Lastzyklenanzahl.
%
%#####

variation = 2;
% 0 = Basisresultate
% 1 = Variation SKF alpha_m
% 2 = Variation SKF alpha_t
% 3 = Variation Wärmeübergangskoeffizient%
% 5 = Variation der Wandstärke
% 6 = Variation des Zeitversatzes
% 7 = Variation des Innendurchmessers

recalc = 1; % 0=nur Diagramm, 1=mit Datenakumulation
draw_DD = 0;
draw_max_DD = 1;
dates = [20120501;20120511;20120521;20120601;20120604];
sims = ['A' 'A' 'B' 'C' 'D' 'D' 'E'];
ds = [1 1 3 5 5 5 3];

switch variation
case 1
    vars1 = [100 120 140 160 180 200 220];
    vars2 = [];
    sims = ['A' 'A' 'B' 'C' 'D' 'D'];
    ds = [1 1 3 5 5 5];
case 2
    vars1 = [100 120 140 160 180 200 220];
    vars2 = [];
    sims = ['A' 'A' 'B' 'C' 'D' 'D'];
    ds = [1 1 3 5 5 5];
case 3
    vars1 = [50 200 400]; % Skalierter Wärmeübergangskoeffizient
    vars2 = [100 1000 10000]; % konstanter Wärmeübergangskoeffizient
case 5
    vars1 = [110 120 130 200];
    vars2 = [];
case 6
    vars1 = [-60 -30 -15 15 30 60];
    vars2 = [];
case 7
    vars1 = [110 120 130 140 150];
    vars2 = [];
end

switch variation
case 0
    resultname = 'base';
    if recalc == 1
        overview1 = zeros(2,7);
        for schnittloop=1:7

```

```

for dateloop=1:length(dates)

    schaden = importdata(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
        '__',num2str(dates(dateloop)),'_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
        '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));

    %Summierung der Schädigungen über alle Tage
    D_ges = 0;
    if isempty(schaden.LC_komplett) == 1

    else
        for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
            D_ges = D_ges + schaden.LC_komplett(i,9);
        end
    end
    overview1(1,schnittloop) = overview1(1,schnittloop) + D_ges;

    %Summieren der Lastwechsel über alle Tage
    N_ges = 0;
    if isempty(schaden.LC_komplett) == 1

    else
        for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
            if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                N_ges = N_ges + schaden.LC_komplett(i,6);
            end
        end
    end
    overview1(2,schnittloop) = overview1(2,schnittloop) + N_ges;
end
end

figure
subplot(2,1,1)
hbar = bar(overview1(1,:), 'FaceColor',[0.8 0.8 0.8], 'BarWidth',0.8);
%xlabel('Spannungsschwingbreite \sigma_v_a [N/mm^2]', 'FontSize',10, 'FontName', 'Times');
ylabel('Gesamtschädigung \itDrm', 'FontSize',10, 'FontName', 'Times');
set(gca, 'YTick', (0:0.4E-4:2E-4));
set(gca, 'FontSize',10, 'FontName', 'Times');
set(gca, 'YGrid', 'on');
%set(gca, 'Position', [0.13 0.53 0.775 0.4]);
%title(strcat());

subplot(2,1,2)
bar(overview1(2,:), 'FaceColor',[0.5 0.5 0.5], 'BarWidth',0.8);
xlabel('Schnitt', 'FontSize',10, 'FontName', 'Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl', 'FontSize',10, 'FontName', 'Times');
set(gca, 'FontSize',10, 'FontName', 'Times');
set(gca, 'YTick', (0:1:6));
set(gca, 'XTickLabel', {'1:DT' '2:DT' '3:ÜHS' '4:ÜHS' '5:FDL' '6:FDL' '7:Receiver'});
set(gca, 'YGrid', 'on');
%set(gca, 'Position', [0.13 0.1 0.775 0.4]);

saveas(gca, strcat('resultplot_schaden_', resultname, '.fig'));

set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 16 10]);
print('-dmeta', '-r300', strcat('resultplot_schaden_', resultname));

case 1
resultname = 'var_alpham';
if recalc == 1
    overview1 = zeros(length(vars1)+length(vars2), length(sims)); %Gesamtschädigung
    overview2 = zeros(length(vars1)+length(vars2), length(sims)); %Gesamtlastzyklenanzahl
    overview3 = zeros(length(vars1)+length(vars2), length(sims)); %Warmstartschädigung
    overview4 = zeros(length(vars1)+length(vars2), length(sims)); %Schädigung durch sonstige Lastwechsel
    overview5 = zeros(length(vars1)+length(vars2), length(sims)); %Betriebsschädigung/Warmstartsch. (Mittel)
    overview6 = zeros(length(vars1)+length(vars2), length(sims)); %max Betriebsschädigung/Warmstartsch.

    for varloop=1:length(vars1)
        for schnittloop=1:length(sims)
            for dateloop=1:length(dates)

                schaden = importdata(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                    '_var_alpham',num2str(vars1(varloop)),'_',num2str(dates(dateloop)),'_ds_',num2str(ds(schnittloop))),...

```

```

    '_schnitt_',num2str(schnittloop),'mat'));

%Summierung der Schädigungen über alle Tage
D_ges = 0;
D_warmst = 0;
D_op = 0;
j = 0;
if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
else
    for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
        D_ges = D_ges + schaden.LC_komplett(i,9);
        j=j+1;
    end
    if j > 2 && length(schaden.LC_komplett(:,1)) > 2
        lastzyklen = zeros(length(schaden.LC_komplett(:,1)),length(schaden.LC_komplett(1,:)));
        j=0;
        for i=1:length((schaden.LC_komplett(:,1))) %entfernt Zeilen ohne Schädigung
            if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                j=j+1;
                lastzyklen(j,:) = schaden.LC_komplett(i,:);
            end
        end
        lastzyklen = lastzyklen(1:j,:);
        if length(lastzyklen(:,1)) > 2 % weiter Lastwechsel außer Warmstart enthalten
            lastzyklen = sortrows(lastzyklen,4);
            D_warmst = D_warmst + lastzyklen(1,9);
            lastzyklen = lastzyklen(2:end,:);

            lastzyklen = sortrows(lastzyklen,5);
            D_warmst = D_warmst + lastzyklen(end,9);
            lastzyklen = lastzyklen(1:end-1,:);
            D_op = sum(lastzyklen(:,9));
        end
    end
    overview1(varloop,schnittloop) = overview1(varloop,schnittloop) + D_ges;
    overview3(varloop,schnittloop) = overview3(varloop,schnittloop) + D_warmst;
    overview4(varloop,schnittloop) = overview4(varloop,schnittloop) + D_op;

    if D_op/D_warmst*100 > overview6(varloop,schnittloop)
        overview6(varloop,schnittloop) = D_op/D_warmst*100;
    end

%Summieren der Lastwechsel über alle Tage
N_ges = 0;
if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
else
    for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
        if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
            N_ges = N_ges + schaden.LC_komplett(i,6);
        end
    end
    overview2(varloop,schnittloop) = overview2(varloop,schnittloop) + N_ges;
end
end
end
overview5 = overview4./(overview1-overview4)*100;
end
if draw_DD == 1
    n_subplots = 4;
    h_print = 16;
else
    n_subplots = 3;
    h_print = 10;
end

figure
subplot(n_subplots,1,[1 2])
%bar(overview1(:,:),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8],'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview1(1:end-1,:));
set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);

```



```

set(hbar(6),'FaceColor',[0.1 0.1 0.1]);
%set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

legend('Basis','120%','140%','160%',...
       '180%','200%','220%');
%legend('Location','Best');
%xlabel('Spannungsschwingbreite \sigma_v_a [N/mm^2]',FontSize,10,FontName,'Times');
ylabel('Gesamtschädigung \itD\rm','FontSize',10,FontName,'Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
%ylim([0 5.2E-3]);
%set(gca,'YTick',(0:0.5E-3:10E-3));
set(gca,'FontSize',10,FontName,'Times');
set(gca,'YGrid','on');

title(strcat('Variation: \it\alpha\rm_m 100%-200% (Schrittweite: 20%)'));

if draw_DD == 1
    subplot(n_subplots,1,3)
    if draw_max_DD == 0
        hbar = bar(overview5(1:end-1,:));
        ylabel('\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b\itD\rm_W_a_r_m_s_t_a_r_t [%]','FontSize',10,FontName,'Times');
    else
        hbar = bar(overview6(1:end-1,:));
        ylabel('max.\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b\itD\rm_W_a_r_m_s_t_a_r_t [%]','FontSize',10,FontName,'Times');
    end
    set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],LineWidth,1.5);
    set(hbar(2),'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
    set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
    set(hbar(4),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
    set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
    set(hbar(6),'FaceColor',[0.1 0.1 0.1]);
    %set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

    xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
    %set(gca,'YTick',(0:10:200));
    set(gca,'FontSize',10,FontName,'Times');
    set(gca,'YGrid','on');
    set(gca,'YMinorTick','on');
end

subplot(n_subplots,1,n_subplots)
%bar(overview2(:,:),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5],BarWidth,0.8);
hbar = bar(overview2(1:end-1,:));
set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],LineWidth,1.5);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
set(hbar(6),'FaceColor',[0.1 0.1 0.1]);
%set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

xlabel('Schnitt','FontSize',10,FontName,'Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl','FontSize',10,FontName,'Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
set(gca,'FontSize',10,FontName,'Times');
set(gca,'YTick',(0:5:10));
set(gca,'XTickLabel',{'1:DT' '2:DT' '3:ÜHS' '4:ÜHS' '5:FDL' '6:FDL' '7:Receiver'});
set(gca,'YGrid','on');
set(gca,'YMinorTick','on');
%ylim([0 6]);

saveas(gca,strcat('resultplot_schaden_',resultname,'.fig'));

set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 h_print]);
print('-dmeta','-r300',strcat('resultplot_schaden_',resultname));

case 2
resultname = 'var_alphat';
if recalc == 1
    overview1 = zeros(length(vars1)+length(vars2),length(sims)); %Gesamtschädigung
    overview2 = zeros(length(vars1)+length(vars2),length(sims)); %Gesamtlastzyklenanzahl
    overview3 = zeros(length(vars1)+length(vars2),length(sims)); %Warmstartschädigung
    overview4 = zeros(length(vars1)+length(vars2),length(sims)); %Schädigung durch sonstige Lastwechsel
    overview5 = zeros(length(vars1)+length(vars2),length(sims)); %Betriebsschädigung/Warmstartsch. (Mittel)
    overview6 = zeros(length(vars1)+length(vars2),length(sims)); %max Betriebsschädigung/Warmstartsch.

```

```

for varloop=1:length(vars1)
    for schnittloop=1:length(sims)
        for dateloop=1:length(dates)

            schaden = importdata(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                '_var_'.alpha(num2str(vars1(varloop))), '__',num2str(dates(dateloop)), '_ds_',num2str(ds(schnittloop))),...
                '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));

            %Summierung der Schädigungen über alle Tage
            D_ges = 0;
            D_warmst = 0;
            D_op = 0;
            j = 0;
            if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
                else
                    for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
                        D_ges = D_ges + schaden.LC_komplett(i,9);
                        j=j+1;
                    end
                    if j > 2 && length(schaden.LC_komplett(:,1)) > 2
                        lastzyklen = zeros(length(schaden.LC_komplett(:,1)),length(schaden.LC_komplett(1,:)));
                        j=0;
                        for i=1:length((schaden.LC_komplett(:,1))) %entfernt Zeilen ohne Schädigung
                            if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                                j=j+1;
                                lastzyklen(j,:) = schaden.LC_komplett(i,:);
                            end
                        end
                        lastzyklen = lastzyklen(1:j,:);
                        if length(lastzyklen(:,1)) > 2 % weiter Lastwechsel außer Warmstart enthalten
                            lastzyklen = sortrows(lastzyklen,4);
                            D_warmst = D_warmst + lastzyklen(1,9);
                            lastzyklen = lastzyklen(2:end,:);

                            lastzyklen = sortrows(lastzyklen,5);
                            D_warmst = D_warmst + lastzyklen(end,9);
                            lastzyklen = lastzyklen(1:end-1,:);
                            D_op = sum(lastzyklen(:,9));
                        end
                    end
                end
            end
            overview1(varloop,schnittloop) = overview1(varloop,schnittloop) + D_ges;
            overview3(varloop,schnittloop) = overview3(varloop,schnittloop) + D_warmst;
            overview4(varloop,schnittloop) = overview4(varloop,schnittloop) + D_op;

            if D_op/D_warmst*100 > overview6(varloop,schnittloop)
                overview6(varloop,schnittloop) = D_op/D_warmst*100;
            end

            %Summieren der Lastwechsel über alle Tage
            N_ges = 0;
            if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
                else
                    for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
                        if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                            N_ges = N_ges + schaden.LC_komplett(i,6);
                        end
                    end
                end
            end
            overview2(varloop,schnittloop) = overview2(varloop,schnittloop) + N_ges;
        end
    end
end
overview5 = overview4./(overview1-overview4)*100;
end
if draw_DD == 1
    n_subplots = 4;
    h_print = 16;
else
    n_subplots = 3;
    h_print = 10;
end

figure
subplot(n_subplots,1,[1 2])

```

```

%bar(overview1(:,:),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8],'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview1(1:end-1,:));
set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
set(hbar(6),'FaceColor',[0.1 0.1 0.1]);
%set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

legend('Basis','120%','140%','160%',...
'180%','200%','220%');
%legend('Location','Best');
%xlabel('Spannungsschwingbreite \sigma_v_a [N/mm^2]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Gesamtschädigung \itD\rm','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
%ylim([0 5.2E-3]);
%set(gca,'YTick',(0:0.5E-3:10E-3));
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YGrid','on');

title(strcat('Variation: \it\alpha\rm_t 100%-200% (Schrittweite: 20%)'));

if draw_DD == 1
    subplot(n_subplots,1,3)
    if draw_max_DD == 0
        hbar = bar(overview5(:,:));
        ylabel('\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/\itD\rm_W_a_r_m_s_t_a_r_t [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    else
        hbar = bar(overview6(:,:));
        ylabel('max.(\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/D_W_a_r_m_s_t_a_r_t) [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    end
    set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
    set(hbar(2),'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
    set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
    set(hbar(4),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
    set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
    set(hbar(6),'FaceColor',[0.1 0.1 0.1]);
    %set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

    xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
    %set(gca,'YTick',(0:10:200));
    set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
    set(gca,'YGrid','on');
    set(gca,'YMinorTick','on');
end

subplot(n_subplots,1,n_subplots)
%bar(overview2(:,:),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5],'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview2(1:end-1,:));
set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
set(hbar(6),'FaceColor',[0.1 0.1 0.1]);
%set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

xlabel('Schnitt','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YTick',(0:5:10));
set(gca,'XTickLabel',{'1:DT' '2:DT' '3:ÜHS' '4:ÜHS' '5:FDL' '6:FDL' '7:Receiver'});
set(gca,'YGrid','on');
set(gca,'YMinorTick','on');
ylim([0 6]);

saveas(gca,strcat('resultplot_schaden_',resultname,'.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 h_print]);
print('-dmeta','-r300',strcat('resultplot_schaden_',resultname));

case 3
    resultname = 'var_alphai';
    if recalc == 1
        overview1 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Gesamtschädigung

```

```

overview2 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Gesamtlastzyklenanzahl
overview3 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Warmstartschädigung
overview4 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Schädigung durch sonstige Lastwechsel
overview5 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Betriebsschädigung/Warmstartsch. (Mittel)
overview6 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %max Betriebsschädigung/Warmstartsch.

for varloop=1:length(vars1)+length(vars2)+1
    for schnittloop=1:length(sims)
        for dateloop=1:length(dates)

            if varloop == 1
                schaden = importdata(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                    '_var_alpha',num2str(vars1(varloop)),'_',num2str(dates(dateloop)),'_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                    '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
            elseif varloop == 2
                schaden = importdata(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                    '__',num2str(dates(dateloop)),'_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                    '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
            elseif varloop <= length(vars1)+1
                schaden = importdata(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                    '_var_alpha',num2str(vars1(varloop-1)),'_',num2str(dates(dateloop)),'_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                    '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
            else
                schaden = importdata(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                    '_var_alphaconst',num2str(vars2(varloop-length(vars1)-
1)), '__',num2str(dates(dateloop)),'_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                    '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
            end

            %Summierung der Schädigungen über alle Tage
            D_ges = 0;
            D_warmst = 0;
            D_op = 0;
            j = 0;
            if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
            else
                for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
                    D_ges = D_ges + schaden.LC_komplett(i,9);
                    j=j+1;
                end
                if j > 2 && length(schaden.LC_komplett(:,1)) > 2
                    lastzyklen = zeros(length(schaden.LC_komplett(:,1)),length(schaden.LC_komplett(1,:)));
                    j=0;
                    for i=1:length((schaden.LC_komplett(:,1))) %entfernt Zeilen ohne Schädigung
                        if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                            j=j+1;
                            lastzyklen(j,:) = schaden.LC_komplett(i,:);
                        end
                    end
                    lastzyklen = lastzyklen(1:j,:);
                    if length(lastzyklen(:,1)) > 2 % weiter Lastwechsel außer Warmstart enthalten
                        % Warmstart-Anfahrerschädigung
                        lastzyklen = sortrows(lastzyklen,4);
                        D_warmst = D_warmst + lastzyklen(1,9);
                        lastzyklen = lastzyklen(2:end,:);

                        % Warmstart - Abfahrerschädigung
                        lastzyklen = sortrows(lastzyklen,5);
                        D_warmst = D_warmst + lastzyklen(end,9);

                        % Betriebsschädigung
                        lastzyklen = lastzyklen(1:end-1,:);
                        D_op = sum(lastzyklen(:,9));
                    end
                end
            end
            overview1(varloop,schnittloop) = overview1(varloop,schnittloop) + D_ges;
            overview3(varloop,schnittloop) = overview3(varloop,schnittloop) + D_warmst;
            overview4(varloop,schnittloop) = overview4(varloop,schnittloop) + D_op;

            if D_op/D_warmst*100 > overview6(varloop,schnittloop)
                overview6(varloop,schnittloop) = D_op/D_warmst*100;
            end

            %Summieren der Lastwechsel über alle Tage
            N_ges = 0;

```

```

        if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
        else
            for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
                if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                    N_ges = N_ges + schaden.LC_komplett(i,6);
                end
            end
        end
        overview2(varloop,schnittloop) = overview2(varloop,schnittloop) + N_ges;
    end
end
end
overview5 = overview4./(overview1-overview4)*100;
end
if draw_DD == 1
    n_subplots = 4;
    h_print = 16;
else
    n_subplots = 3;
    h_print = 10;
end

figure
subplot(n_subplots,1,[1 2])
%bar(overview1(:,:), 'FaceColor',[0.8 0.8 0.8], 'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview1(:,:));
set(hbar(1), 'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
set(hbar(2), 'FaceColor',[1 1 1], 'LineWidth',1.5);
set(hbar(3), 'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
set(hbar(4), 'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(5), 'FaceColor',[0.4 0.4 0.4], 'LineStyle','--');
set(hbar(6), 'FaceColor',[0.3 0.3 0.3], 'LineStyle','--');
set(hbar(7), 'FaceColor',[0.2 0.2 0.2], 'LineStyle','--');

legend('50%', 'Basis', '200%', ...
    '400%', '100W/m²/K', '1000W/m²/K', '10000W/m²/K');
%legend('Location','Best');
%xlabel('Spannungsschwingbreite \sigma_v_a [N/mm²]', 'FontSize',10, 'FontName','Times');
ylabel('Gesamtschädigung \itD\rm', 'FontSize',10, 'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
%ylim([0 5.2E-3]);
%set(gca, 'YTick', (0:0.5E-3:10E-3));
set(gca, 'FontSize',10, 'FontName','Times');
set(gca, 'YGrid', 'on');

title(strcat({'Variation: \it\alpha\rm_i_n_e_n 50%-400%(zustandsabhängig)' und 100-10000W/m²/K (konstant)'}));

if draw_DD == 1
    subplot(n_subplots,1,3)
    if draw_max_DD == 0
        hbar = bar(overview5(:,:));
        ylabel('\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/\itD\rm_W_a_r_m_s_t_a_r_t [%]', 'FontSize',10, 'FontName','Times');
    else
        hbar = bar(overview6(:,:));
        ylabel('max.(\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/\itD\rm_W_a_r_m_s_t_a_r_t) [%]', 'FontSize',10, 'FontName','Times');
    end
    set(hbar(1), 'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
    set(hbar(2), 'FaceColor',[1 1 1], 'LineWidth',1.5);
    set(hbar(3), 'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
    set(hbar(4), 'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
    set(hbar(5), 'FaceColor',[0.4 0.4 0.4], 'LineStyle','--');
    set(hbar(6), 'FaceColor',[0.3 0.3 0.3], 'LineStyle','--');
    set(hbar(7), 'FaceColor',[0.2 0.2 0.2], 'LineStyle','--');

    xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
    %set(gca, 'YTick', (0:10:200));
    set(gca, 'FontSize',10, 'FontName','Times');
    set(gca, 'YGrid', 'on');
    set(gca, 'YMinorTick', 'on');
end

subplot(n_subplots,1,n_subplots)
%bar(overview2(:,:), 'FaceColor',[0.5 0.5 0.5], 'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview2(:,:));
set(hbar(1), 'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
set(hbar(2), 'FaceColor',[1 1 1], 'LineWidth',1.5);

```

```

set(hbar(3),'FaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.4 0.4 0.4],'LineStyle','--');
set(hbar(6),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3],'LineStyle','--');
set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2],'LineStyle','--');

xlabel('Schnitt','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YTick',(0:5:10));
set(gca,'XTickLabel',{'1:DT' '2:DT' '3:ÜHS' '4:ÜHS' '5:FDL' '6:FDL' '7:Receiver'});
set(gca,'YGrid','on');
set(gca,'YMinorTick','on');
ylim([0 7]);

saveas(gca, strcat('resultplot_schaden_', resultname, '.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 h_print]);
print('-dmeta','-r300', strcat('resultplot_schaden_', resultname));

case 5
resultname = '_var_wandst';
if recalc == 1
    overview1 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Gesamtschädigung
    overview2 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Gesamtlastzyklenanzahl
    overview3 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Warmstartschädigung
    overview4 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Schädigung durch sonstige Lastwechsel
    overview5 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Betriebsschädigung/Warmstartsch. (Mittel)
    overview6 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %max Betriebsschädigung/Warmstartsch.

    for varloop=1:length(vars1)+length(vars2)+1
        for schnittloop=1:length(sims)
            for dateloop=1:length(dates)

                if varloop == 1
                    load(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                        '_','_num2str(dates(dateloop))','_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                        '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
                else
                    load(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                        'resultname,num2str(vars1(varloop-1))','_',num2str(dates(dateloop))','_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                        '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
                end

                %Summierung der Schädigungen über alle Tage
                D_ges = 0;
                D_warmst = 0;
                D_op = 0;
                j = 0;
                if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
                    else
                        for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
                            D_ges = D_ges + schaden.LC_komplett(i,9);
                            j=j+1;
                        end
                        if j > 2 && length(schaden.LC_komplett(:,1)) > 2
                            lastzyklen = zeros(length(schaden.LC_komplett(:,1)),length(schaden.LC_komplett(1,:)));
                            j=0;
                            for i=1:length((schaden.LC_komplett(:,1))) %entfernt Zeilen ohne Schädigung
                                if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                                    j=j+1;
                                    lastzyklen(j,:) = schaden.LC_komplett(i,:);
                                end
                            end
                        end
                        lastzyklen = lastzyklen(1:j,:);
                        if length(lastzyklen(:,1)) > 2 % weiter Lastwechsel außer Warmstart enthalten
                            lastzyklen = sortrows(lastzyklen,4);
                            D_warmst = D_warmst + lastzyklen(1,9);
                            lastzyklen = lastzyklen(2:end,:);

                            lastzyklen = sortrows(lastzyklen,5);
                            D_warmst = D_warmst + lastzyklen(end,9);
                            lastzyklen = lastzyklen(1:end-1,:);
                            D_op = sum(lastzyklen(:,9));
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end

```

```

        end
    end
    overview1(varloop,schnittloop) = overview1(varloop,schnittloop) + D_ges;
    overview3(varloop,schnittloop) = overview3(varloop,schnittloop) + D_warmst;
    overview4(varloop,schnittloop) = overview4(varloop,schnittloop) + D_op;

    if D_op/D_warmst*100 > overview6(varloop,schnittloop)
        overview6(varloop,schnittloop) = D_op/D_warmst*100;
    end

    %Summieren der Lastwechsel über alle Tage
    N_ges = 0;
    if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
    else
        for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
            if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                N_ges = N_ges + schaden.LC_komplett(i,6);
            end
        end
    end
    overview2(varloop,schnittloop) = overview2(varloop,schnittloop) + N_ges;
end
end
overview5 = overview4./(overview1-overview4)*100;
end
if draw_DD == 1
    n_subplots = 4;
    h_print = 16;
else
    n_subplots = 3;
    h_print = 10;
end

figure
subplot(n_subplots,1,[1 2])
%bar(overview1(:,:),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8],'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview1(:,:).');

set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

legend('Basis','110%','120%','130%','200%');
%legend('Location','Best');
%xlabel('Spannungsschwingbreite \sigma_v_a [N/mm^2]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Gesamtschädigung \itD\rm','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
%ylim([0 5.2E-3]);
set(gca,'YTick',(0:0.2E-4:10E-3));
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YGrid','on');

title(strcat('Variation: Wanstärke \ite\rm_s 100%-200%'));

if draw_DD == 1
    subplot(n_subplots,1,3)
    if draw_max_DD == 0
        hbar = bar(overview5(1:end,:).');
        ylabel("\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/\itD\rm_W_a_r_m_s_t_a_r_t [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    else
        hbar = bar(overview6(1:end,:).');
        ylabel('max.(\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/D_W_a_r_m_s_t_a_r_t) [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    end
    set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
    set(hbar(2),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
    set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
    set(hbar(4),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
    set(hbar(5),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

    ylabel('D_B_e_t_r_i_e_b/D_W_a_r_m_s_t_a_r_t [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
    %set(gca,'YTick',(0:10:200));
    set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');

```

```

    set(gca,'YGrid','on');
    set(gca,'YMinorTick','on');
end

subplot(n_subplots,1,n_subplots)
%bar(overview2(:,:),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5],'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview2(:,:));
set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

xlabel('Schnitt','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YTick',(0:5:10));
set(gca,'XTickLabel',{'1:DT' '2:DT' '3:ÜHS' '4:ÜHS' '5:FDL' '6:FDL' '7:Receiver'});
set(gca,'YGrid','on');
set(gca,'YMinorTick','on');
ylim([0 6]);

saveas(gca, strcat('resultplot_schaden', resultname, '.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 h_print]);
print('-dmeta','-r300', strcat('resultplot_schaden', resultname));

case 6
resultname = '_var_tshift';
if recalc == 1
    overview1 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Gesamtschädigung
    overview2 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Gesamtlastzyklenanzahl
    overview3 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Warmstartschädigung
    overview4 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Schädigung durch sonstige Lastwechsel
    overview5 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Betriebsschädigung/Warmstartsch. (Mittel)
    overview6 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %max Betriebsschädigung/Warmstartsch.

    for varloop=1:length(vars1)+length(vars2)+1
        for schnittloop=1:length(sims)
            for dateloop=1:length(dates)

                if varloop < 4
                    load(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                        resultname,num2str(vars1(varloop)), '_ ',num2str(dates(dateloop)), '_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                        '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
                elseif varloop == 4
                    load(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                        '_ ',num2str(dates(dateloop)), '_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                        '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
                else
                    load(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                        resultname,num2str(vars1(varloop-1)), '_ ',num2str(dates(dateloop)), '_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                        '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
                end

                %Summierung der Schädigungen über alle Tage
                D_ges = 0;
                D_warmst = 0;
                D_op = 0;
                j = 0;
                if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
                    else
                        for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
                            D_ges = D_ges + schaden.LC_komplett(i,9);
                            j=j+1;
                        end
                        if j > 2 && length(schaden.LC_komplett(:,1)) > 2
                            lastzyklen = zeros(length(schaden.LC_komplett(:,1)),length(schaden.LC_komplett(1,:)));
                            j=0;
                            for i=1:length((schaden.LC_komplett(:,1))) %entfernt Zeilen ohne Schädigung
                                if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
                                    j=j+1;
                                    lastzyklen(j,:) = schaden.LC_komplett(i,:);
                                end
                            end
                            lastzyklen = lastzyklen(1:j,:);
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```



```

        if length(lastzyklen(:,1)) > 2 % weiter Lastwechsel außer Warmstart enthalten
            lastzyklen = sortrows(lastzyklen,4);
            D_warmst = D_warmst + lastzyklen(1,9);
            lastzyklen = lastzyklen(2:end,:);

            lastzyklen = sortrows(lastzyklen,5);
            D_warmst = D_warmst + lastzyklen(end,9);
            lastzyklen = lastzyklen(1:end-1,:);
            D_op = sum(lastzyklen(:,9));
        end
    end
end
overview1(varloop,schnittloop) = overview1(varloop,schnittloop) + D_ges;
overview3(varloop,schnittloop) = overview3(varloop,schnittloop) + D_warmst;
overview4(varloop,schnittloop) = overview4(varloop,schnittloop) + D_op;

if D_op/D_warmst*100 > overview6(varloop,schnittloop)
    overview6(varloop,schnittloop) = D_op/D_warmst*100;
end

%Summieren der Lastwechsel über alle Tage
N_ges = 0;
if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
else
    for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
        if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
            N_ges = N_ges + schaden.LC_komplett(i,6);
        end
    end
end
overview2(varloop,schnittloop) = overview2(varloop,schnittloop) + N_ges;
end
end
overview5 = overview4./(overview1-overview4)*100;
end

if draw_DD == 1
    n_subplots = 4;
    h_print = 16;
else
    n_subplots = 3;
    h_print = 10;
end

figure
subplot(n_subplots,1,[1 2])
%bar(overview1(:,:),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8],'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview1(:,:));
set(hbar(1),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
set(hbar(4),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.4 0.4 0.4]);
set(hbar(6),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

legend('-60s','-30s','-15s','Basis','+15s','+30s','+60s');
%legend('Location','Best');
%xlabel('Spannungsschwingbreite \sigma_v_a [N/mm^2]','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Gesamtschädigung \itD\rm','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
%ylim([0 5.2E-3]);
set(gca,'YTick',(0:0.5E-4:10E-3));
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YGrid','on');
title('Variation: Zeitversatz -60s bis +60s');

if draw_DD == 1
    subplot(n_subplots,1,3)
    if draw_max_DD == 0
        hbar = bar(overview5(:,:));
        ylabel('\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/\itD\rm_W_a_r_m_s_t_a_r_t [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    else
        hbar = bar(overview6(:,:));
        ylabel('max.(\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/D_W_a_r_m_s_t_a_r_t) [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    end
end

```

```

end
set(hbar(1),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
set(hbar(4),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.4 0.4 0.4]);
set(hbar(6),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
%set(gca,'YTick',(0:10:200));
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YGrid','on');
set(gca,'YMinorTick','on');
end

subplot(n_subplots,1,n_subplots)
%bar(overview2(:,:),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5],'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview2(:,:));
set(hbar(1),'FaceColor',[0.8 0.8 0.8]);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.7 0.7 0.7]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
set(hbar(4),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.4 0.4 0.4]);
set(hbar(6),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
set(hbar(7),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

xlabel('Schnitt','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YTick',(0:5:10));
set(gca,'XTickLabel',{'1:DT' '2:DT' '3:ÜHS' '4:ÜHS' '5:FDL' '6:FDL' '7:Receiver'});
set(gca,'YGrid','on');
ylim([0 6]);
set(gca,'YMinorTick','on');

saveas(gca, strcat('resultplot_schaden', resultname, '.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 h_print]);
print('-dmeta','-r300', strcat('resultplot_schaden', resultname));

case 7
resultname = '_var_di';
if recalc == 1
    overview1 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Gesamtschädigung
    overview2 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Gesamtlastzyklenanzahl
    overview3 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Warmstartschädigung
    overview4 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Schädigung durch sonstige Lastwechsel
    overview5 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %Betriebsschädigung/Warmstartsch. (Mittel)
    overview6 = zeros(length(vars1)+length(vars2)+1,length(sims)); %max Betriebsschädigung/Warmstartsch.

    for varloop=1:length(vars1)+length(vars2)+1
        for schnittloop=1:length(sims)
            for dateloop=1:length(dates)

                if varloop == 1
                    load(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                        '__',num2str(dates(dateloop)), '_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                        '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
                else
                    load(strcat('schaden_',sims(schnittloop),...
                        resultname,num2str(vars1(varloop-1)), '__',num2str(dates(dateloop)), '_ds_',num2str(ds(schnittloop)),...
                        '_schnitt_',num2str(schnittloop),'.mat'));
                end

                %Summierung der Schädigungen über alle Tage
                D_ges = 0;
                D_warmst = 0;
                D_op = 0;
                j = 0;
                if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
                    else
                        for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
                            D_ges = D_ges + schaden.LC_komplett(i,9);
                            j=j+1;
                        end
                    end
            end
        end
    end
end

```

```

if j > 2 && length(schaden.LC_komplett(:,1)) > 2
    lastzyklen = zeros(length(schaden.LC_komplett(:,1)),length(schaden.LC_komplett(1,:)));
    j=0;
    for i=1:length((schaden.LC_komplett(:,1))) %entfernt Zeilen ohne Schädigung
        if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
            j=j+1;
            lastzyklen(j,:) = schaden.LC_komplett(i,:);
        end
    end
    lastzyklen = lastzyklen(1:j,:);
    if length(lastzyklen(:,1)) > 2 % weiter Lastwechsel außer Warmstart enthalten
        lastzyklen = sortrows(lastzyklen,4);
        D_warmst = D_warmst + lastzyklen(1,9);
        lastzyklen = lastzyklen(2:end,:);

        lastzyklen = sortrows(lastzyklen,5);
        D_warmst = D_warmst + lastzyklen(end,9);
        lastzyklen = lastzyklen(1:end-1,:);
        D_op = sum(lastzyklen(:,9));
    end
end
end
overview1(varloop,schnittloop) = overview1(varloop,schnittloop) + D_ges;
overview3(varloop,schnittloop) = overview3(varloop,schnittloop) + D_warmst;
overview4(varloop,schnittloop) = overview4(varloop,schnittloop) + D_op;

if D_op/D_warmst*100 > overview6(varloop,schnittloop)
    overview6(varloop,schnittloop) = D_op/D_warmst*100;
end

%Summieren der Lastwechsel über alle Tage
N_ges = 0;
if isempty(schaden.LC_komplett) == 1
else
    for i=1:length(schaden.LC_komplett(:,1))
        if schaden.LC_komplett(i,9) > 0
            N_ges = N_ges + schaden.LC_komplett(i,6);
        end
    end
end
overview2(varloop,schnittloop) = overview2(varloop,schnittloop) + N_ges;
end
end
overview5 = overview4./(overview1-overview4)*100;
end
if draw_DD == 1
    n_subplots = 4;
    h_print = 16;
else
    n_subplots = 3;
    h_print = 10;
end

figure
subplot(n_subplots,1,[1 2])
%bar(overview1(:,:), 'FaceColor',[0.8 0.8 0.8], 'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview1(:,:),');

set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1], 'LineWidth',1.5);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.4 0.4 0.4]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
set(hbar(6),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

legend('Basis','110%','120%','130%','140%','150%');
%legend('Location','Best');
%xlabel('Spannungsschwingbreite \sigma_v_a [N/mm^2]', 'FontSize',10, 'FontName','Times');
ylabel('Gesamtschädigung \itD\rm', 'FontSize',10, 'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
%ylim([0 5.2E-3]);
set(gca,'YTick',(0:0.5E-4:10E-3));
set(gca,'FontSize',10, 'FontName','Times');
set(gca,'YGrid','on');

```

```

title(strcat('Variation: Innendurchmesser \itd\rm_i 100%-150%(Schrittweite: 10%)'));

if draw_DD == 1
    subplot(n_subplots,1,3)
    if draw_max_DD == 0
        hbar = bar(overview5(1:end,:));
        ylabel('\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/\itD\rm_W_a_r_m_s_t_a_r_t [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    else
        hbar = bar(overview6(1:end-1,:));
        ylabel('max.(\itD\rm_B_e_t_r_i_e_b/D_W_a_r_m_s_t_a_r_t) [%]','FontSize',10,'FontName','Times');
    end
    set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
    set(hbar(2),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
    set(hbar(3),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
    set(hbar(4),'FaceColor',[0.4 0.4 0.4]);
    set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
    set(hbar(6),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

    xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
    %set(gca,'YTick',(0:10:200));
    set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
    set(gca,'YGrid','on');
    set(gca,'YMinorTick','on');
end

subplot(n_subplots,1,n_subplots)
%bar(overview2(:,:),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5],'BarWidth',0.8);
hbar = bar(overview2(:,:));
set(hbar(1),'FaceColor',[1 1 1],'LineWidth',1.5);
set(hbar(2),'FaceColor',[0.6 0.6 0.6]);
set(hbar(3),'FaceColor',[0.5 0.5 0.5]);
set(hbar(4),'FaceColor',[0.4 0.4 0.4]);
set(hbar(5),'FaceColor',[0.3 0.3 0.3]);
set(hbar(6),'FaceColor',[0.2 0.2 0.2]);

xlabel('Schnitt','FontSize',10,'FontName','Times');
ylabel('Lastzyklenanzahl','FontSize',10,'FontName','Times');
xlim([0.5 length(sims)+0.5]);
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times');
set(gca,'YTick',(0:5:10));
set(gca,'XTickLabel',{'1:DT' '2:DT' '3:ÜHS' '4:ÜHS' '5:FDL' '6:FDL' '7:Receiver'});
set(gca,'YGrid','on');
set(gca,'YMinorTick','on');
ylim([0 6]);

saveas(gca,strcat('resultplot_schaden',resultname,'.fig'));
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[0 0 16 h_print]);
print('-dmeta','-r300',strcat('resultplot_schaden',resultname));

end

```

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet habe.

Düsseldorf, den 1. Mai 2014

(Unterschrift)

Mit der Weitergabe meiner Master Thesis durch die Universität Koblenz-Landau an Dritte (z.B. Bibliotheken, Behörden, Unternehmen, interessierte Privatpersonen) erkläre ich mich einverstanden.

Düsseldorf, den 01.05.2014

(Unterschrift)